



**MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DE ACEROS DE BAJO CARBONO MEDIANTE
LASER CLADDING Y SUSPENSIÓN ENRIQUECIDA CON CENIZAS VOLANTES.**

SANTIAGO VALENCIA MARTÍNEZ

Ingeniería Mecánica

JOSE WILLIAM RESTREPO MONTOYA

**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERIA MECÁNICA
ENVIGADO
AÑO 2018**

AGRADECIMIENTOS

Medellín, noviembre 10 de 2019

Quiero agradecer de manera especial la valiosa colaboración que me fue dada por todo el equipo de laboratorios de la Universidad EIA, quienes no dudaron en ayudarme en todo aquello que requerí para el desarrollo de este trabajo de grado.

Mi entero agradecimiento para el profesor José William Restrepo, director de este trabajo de grado, quien me guio en todo momento con su invaluable conocimiento, pero por sobre todo con su gran personalidad y sus valores, es una gran persona a quien siempre considerare como modelo a seguir.

SANTIAGO VALENCIA MARTÍNEZ

Estudiante EIA

Ingeniería Mecánica

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	3
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	7
INTRODUCCIÓN	8
1. PRELIMINARES	9
1.1 Planteamiento del problema	9
1.2 Objetivos del proyecto	11
1.2.1 Objetivo General	11
1.2.2 Objetivo específico	11
1.3 Marco de referencia.....	11
1.3.1 Estado del arte	11
1.3.2 Marco teórico.....	12
3.1.2.1 Aceros bajos en carbono.....	12
1.1.1.1 Características superficiales de materiales	13
3.1.2.2 Cenizas volantes de carbón.....	14
3.1.2.3 Agentes para la suspensión.....	16
3.1.2.4 Láser CO ₂	17
3.1.2.5 Técnicas de caracterización.....	17
2. METODOLOGÍA.....	19
2.1 Caracterización de cenizas volantes	19
2.2 Preparación de suspensión	20
2.3 Probetas de acero	24
2.4 Recubrimiento de las probetas	28
2.5 Diseño de las condiciones de irradiación.....	30
2.6 Ensayo tribológico	32

3.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	33
3.1	Caracterización de cenizas volantes	33
3.2	Preparación de la Suspensión	35
3.3	Probetas de Acero	40
3.4	Revestimiento de probetas	43
3.5	Irradiación laser	46
3.6	Ensayos tribológicos.....	53
4.	CONCLUSIONES.....	58
5.	Trabajos futuros.....	60
6.	Bibliografía.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Superficies en contacto a nivel microscópico (“Friction between surfaces - Fricción - Wikipedia, la enciclopedia libre,” n.d.).....	13
Figura 2. Preparación de primeras pruebas de suspensión: (a) pesaje de aglutinantes, (b) 2g de cada aglutinante y (c) beakers para cada aglutinante.....	22
Figura 3. Mezclas agitándose.....	23
Figura 4. Pesaje de cenizas volantes.....	23
Figura 5. Placa de acero 1020.....	25
Figura 6. Placa de acero esmerilada.....	25
Figura 7. Placas de acero lijadas a espejo.....	26
Figura 8. Depositando la suspensión sobre las probetas de acero.....	28
Figura 9. Probetas recubiertas con: (a) una capa, (b) dos capas y (c) tres capas de suspensión.....	30
Figura 10. Primera matriz de densidad de energía.....	31
Figura 11. Imágenes obtenidas por SEM.....	33
Figura 12. Imagen de mapeo obtenida por FTIR.....	34
Figura 13. Concentraciones de los diferentes elementos presentes en las cenizas volantes.....	35
Figura 14. Resultados PVA.....	36
Figura 15. Resultados CMC.....	36
Figura 16. Resultados Almidón.....	37
Figura 17. Segunda prueba de suspensión, 1g de CMC y 2g cenizas volantes.....	38
Figura 18. Tercera prueba de suspensión, 0.2g CMC y 10g de cenizas volantes.....	39
Figura 19. Cuarta prueba de suspensión 10g de ceniza volante y: (a) 0.3g de CMC y (b) 0.4g de CMC.....	39
Figura 20. Suspensión con silicato de sodio.....	40
Figura 21. Imágenes obtenidas por microscopia óptica de las superficies de acero.....	41
Figura 22. Imágenes 3D de las probetas con aumento x100.....	41
Figura 23. Ensayo de rugosidad, donde eje X es el avance sobre la superficie de la probeta y el eje Y es la variación de altura de la superficie, ambas medidas en micras.....	42
Figura 24. Defectos en probetas recubiertas: (a) Presencia de óxidos en el recubrimiento y (b) desprendimiento de recubrimiento.....	44
Figura 25. Aerógrafo.....	45
Figura 26. Probeta recubierta con la suspensión obtenida con aceite de linaza.....	45
Figura 27. Probetas marcadas con la matriz de la figura 17.....	46
Figura 28. Nuevas probetas recubiertas con dos y tres capas de suspensión.....	48
Figura 29. Matrices de densidad de energía 5x5.....	49
Figura 30. Nuevas probetas marcadas con su respectiva matriz.....	49
Figura 31. Superficie de calamina recubierta e irradiada.....	51
Figura 32. Superficie esmerilada, dos capas, con densidad de energía.....	52
Figura 33. Probetas de 2.5 cm de lado recubiertas e irradiadas: (a) superficie de calamina y (b) superficie esmerilada.....	53
Figura 34. Imágenes 3D de los sustratos revestidos.....	54
Figura 35. Comparativo de resultados de ensayos tribológicos antes y después de tratarlas con el láser para: (a) superficie de calamina y (b) superficie esmerilada.....	55
Figura 36. Imágenes obtenidas por microscopia: (a) superficie de calamina sin tratar, (b) superficie de calamina tratada, (c) superficie esmerilada sin tratar y (d) superficie esmerilada tratada.....	56
Figura 37. Imágenes obtenidas por microscopia de contra cuerpos de alúmina después de los ensayos tribológicos: superficie de calamina: (a) antes de recubrir y (b) recubierta e irradiada, y superficie esmerilada: (c) antes de recubrir y (d) recubierta e irradiada.....	57

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Elementos presentes en las cenizas volantes</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2 Resumen de resultados de agentes aglutinantes.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3. Parámetros seleccionados.....</i>	<i>53</i>

INTRODUCCIÓN

Muchos componentes y piezas mecánicas se fabrican en diferentes tipos de aceros aprovechando las propiedades mecánicas que les provee. Algunos componentes se fabrican en aceros especiales en aplicaciones donde se requiere resistencia superficial al desgaste o altos coeficientes de fricción. Estos aceros, por lo general son costosos, por lo cual una alternativa llamativa es utilizar aceros bajo carbono que son más económicos para modificar sus propiedades superficiales sin alterar todo su volumen. El revestimiento por láser es uno de estos procesos, con la diferencia que este puede ser replicado sin la necesidad de usar equipos de alta tecnología.

Este trabajo de grado exploratorio, que se presenta en esta memoria, busco determinar si es posible mejorar la resistencia al desgaste superficial de aceros bajo carbono mediante revestimiento láser usando como precursor cenizas resultantes de la combustión de carbón mineral.

Para lograrlo se recolecto cenizas volantes de la combustión del carbón, se elaboró el recubrimiento y se aplicó sobre probetas de acero, haciendo uso de radiación láser para su unión; durante el trabajo exploratorio se desarrolló la metodología para lograr un buen revestimiento láser. A las probetas se les practico ensayos de tribología con los equipos adecuados antes y después de ser recubiertas y se registraron los cambios hallados.

Se espera poder evaluar el nivel de unión entre el recubrimiento y la probeta, la modificación de propiedades y la eficiencia del revestimiento láser, así como obtener los datos que permitan comparar la metodología aplicada con los métodos comúnmente usados.

1. PRELIMINARES

1.1 Planteamiento del problema

Los aceros son materiales muy usados en la ingeniería mecánica por sus propiedades mecánicas y tribológicas; además de su amplia disponibilidad comercial. Dentro de sus propiedades tribológicas en particular se consideran de alta importancia la resistencia al desgaste y el coeficiente de fricción para diferentes componentes mecánicos sometidos a fricción como cojinetes, piñones, levas, rodamientos, ejes, entre otros. En algunos casos estas piezas requieren tratamientos superficiales que permiten llevar las propiedades del acero a las condiciones necesarias para la tarea que ejecutaran, y según sea el nivel de requerimiento, estos procesos se hacen costosos y dispendiosos a la hora de realizarlos.

Estos tratamientos superficiales son variados y permiten alterar la superficie de un material (Weng, Chen, & Yu, 2014). Estos consisten en: remover o agregar material, aplicar energía para alterar el material solo superficialmente o cambiar la geometría de la superficie microscópicamente. Ejemplos de estos tratamientos son la cementación, el temple por inducción, el temple con localizado laser y el revestimiento por fusión selectiva laser.

La cementación consiste en calentar el acero en presencia de un material que contenga carbono; mediante mecanismos de difusión, el acero absorbe el carbono depositándolo en la superficie que al enfriarse presenta una mayor dureza. Dependiendo de la temperatura y el tiempo, puede llegar a variar tanto la cantidad de carbono como la profundidad afectada (Kula, Pietrasik, & Dybowski, 2005).

El temple por inducción o endurecimiento por inducción es el proceso basado en la inducción electromecánica: la pieza de trabajo, que ha de ser fabricada en material conductor, es puesta en un campo magnético que ocasiona que fluya una corriente eléctrica en el material y así generando calor sobre la misma. Al retirar el campo magnético y enfriarlo en diferentes medios líquidos a variadas velocidades, la superficie se altera, formando una estructura martensítica que provee dureza a la pieza (Broseta Carrasco, 1982). El proceso se hace en máquinas CNC con programación debido a que requiere controlar muchos parámetros como: potencia relacionada a la

temperatura de austenización del componente de acero, velocidades de calentamiento y temple, viscosidad y temperatura de los líquidos de temple, tiempo de temple, entre los más críticos.

El revestimiento por fusión selectiva con láser, comúnmente denominado laser cladding, es uno de estos tratamientos; este es llevado a cabo con equipos que depositan un material precursor en polvo que seguidamente el haz láser funde sobre la superficie de la pieza de trabajo o componente, haciendo que la unión sea un proceso instantáneo a la vez que se obtiene un mayor control sobre el proceso en sí (Pinkerton, 2015). El láser cladding es una técnica avanzada que ha sido poco explorada en Colombia debido al desconocimiento y costos asociados a esta tecnología que no han facilitado su implementación en el ámbito de la industria local. Estos costos están vinculados a los materiales en polvo que por su composición química y granulometría específica requieren procesos especializados y dispendiosos. Las aplicaciones del laser cladding se han limitado al mantenimiento y reconstrucción de componentes costosos como brocas y fresas utilizadas en perforaciones petroleras y en componentes de minería; como también ejes, bujes y otros elementos sometidos a alta fricción.

Por otro lado, se plantea usar las cenizas volantes como material precursor para el recubrimiento. Las cenizas volantes son los desechos sólidos obtenidos de la quema de carbón mineral, usualmente se obtiene a través de precipitación electrostática o por captación mecánica en las centrales termoeléctricas (Weng et al., 2014). Este residuo suele ser usado como aditivo para el hormigón (Blissett & Rowson, 2012). Su alto contenido en óxidos de aluminio y silicio lo hace adecuado para usarlo como material precursor, ya que al fundirlo con láser se esperaba que se fusionara con la superficie de la pieza, bien sea por que se formara un recubrimiento cerámico de alta resistencia o porque se promoviera el enriquecimiento superficial de carbono por mecanismos de difusión.

Las preguntas de investigación que se propuso responder en este trabajo exploratorio fueron: ¿es viable la técnica de aumentar la resistencia al desgaste de Probetas de acero de bajo carbono aprovechando las cenizas volantes mediante un recubrimiento fundido por medio de radiación láser? ¿es necesaria la utilización de equipos especializados de alta tecnología o es posible realizar el proceso con tecnología disponible en el medio local? ¿son las cenizas volantes un buen material precursor para recubrir el acero de bajo carbono?

1.2 Objetivos del proyecto

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la mejora de la resistencia al desgaste en aceros bajo carbono revestidos por fusión con láser de una suspensión precursora enriquecida con cenizas volantes.

1.2.2 Objetivo específico

- Diseñar una suspensión con cenizas volantes, que permita ser fácilmente depositada sobre probetas de acero bajo carbono.
- Seleccionar los parámetros y condiciones de irradiación con láser de probetas de acero recubiertas con la suspensión precursora del revestimiento.
- Examinar las características morfológicas y del revestimiento formado con los parámetros de irradiación láser.
-

1.3 Marco de referencia

1.3.1 Estado del arte

Ya se ha analizado como modificar las propiedades del acero desde el temple con refrigerantes no tradicionales (Pérez Ruiz, Galeano Perilla, & Negrín Hernández, 2016): este artículo realizado en la Universidad Tecnológica de Pereira demuestra que en el país se están haciendo trabajos sobre materiales como los aceros de bajo carbono, incrementando propiedades a través de tratamientos térmicos. También hay estudios sobre la influencia de nitruración por plasma sobre las propiedades superficiales con resultados positivos; se logró una disminución del coeficiente de fricción y un aumento en la resistencia al desgaste de muestras de acero AISI 420 (Pecina, Lover, Dalibon, & Brühl, 2016).

El uso de laser como medio al momento de cambiar características superficiales tiene actualmente varias aplicaciones entre las que se encuentra el vidriado sobre azulejos recubiertos con barnices de cobalto (Gómez & Restrepo, 2014), se espera que la superficie de las probetas recubiertas tenga características de un cerámico, por lo que el anterior proyecto nos da una clara luz de esta posibilidad.

Sí bien las cenizas volantes de carbón son más utilizadas en la elaboración de cementos portland (Torres-Carrasco & Puertas, 2017), y ya hay estudios que validan su uso como material de refuerzo (Universidad de Medellín, 2015); haciendo uso de las cenizas volantes como refuerzo de materiales polímeros con aspecto muy similar al comercial y aumentando propiedades como resistencia a la tracción, resistencia a la temperatura, la dureza, la densidad y el módulo de Young.

1.3.2 Marco teórico

3.1.2.1 Aceros bajos en carbono

Estos aceros son los más comunes en el mercado y presentan una baja concentración de carbono, esto es, entre un 0,008% y un 0,25% en peso de C. Aunque la ductilidad y la tenacidad son algunas de las propiedades destacables de los aceros bajos, su resistencia a altas temperaturas es baja, y por ello se observa un cambio en su estado sólido de alta dureza siendo relativamente blandos cuando ya no se encuentran en presencia de temperaturas elevadas y se enfrían. No obstante, cuando se alean con otros metales, particularmente aquellos conocidos como refractarios, aumentan la resistencia a las altas temperaturas; asimismo, pueden adquirir otras propiedades como facilidad de mecanizado y buena solubilidad. Entre las principales aplicaciones que tienen los aceros bajos en carbono en el mercado se encuentran la fabricación de vigas, carrocerías de automóviles, raíles de ferrocarril, etc. (Groover, Peña Gómez, Martínez Sarmiento, & Sandoval Palafox, 1997).

1.2.1.1 Características superficiales de materiales

La rugosidad es la característica relacionada con la textura de la superficie. Se mide por las imperfecciones respecto a la normal de la superficie que le impiden ser totalmente plana, incluso las superficies más lisas presentan estas imperfecciones a nivel microscópico. Mientras más grandes sean las imperfecciones la superficie será más rugosa.

Esta característica determina otros aspectos de como un objeto interactúa con su entorno. Las superficies rugosas llegan a desgastarse más rápidamente, aunque presentan coeficientes de fricción mas altos que las superficies lisas. También, cuando una superficie es rugosa la adherencia se puede verse promovida (Zhai, Gan, Hanaor, Proust, & Retraint, 2016).

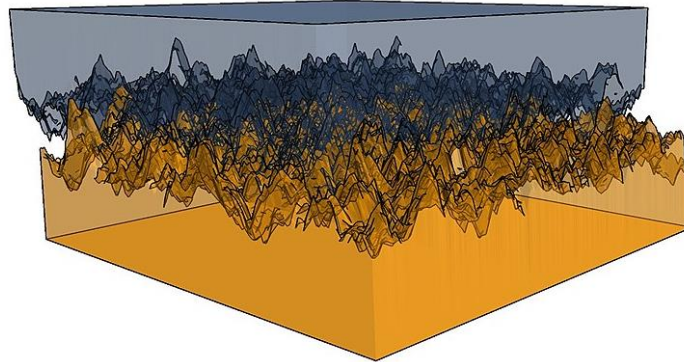


Figura 1. Superficies en contacto a nivel microscópico (“Friction between surfaces - Fricción - Wikipedia, la enciclopedia libre,” n.d.).

Dependiendo de la aplicación, se puede desear un valor tanto como bajo de rugosidad, no obstante, al momento de fabricar es más costoso obtener valores bajos ya que incluso se llega a incurrir en procesos posteriores a la obtención de la pieza como tal. Esto a menudo resulta en una compensación entre el costo de fabricación de un componente y su desempeño en la aplicación.

Un valor de rugosidad puede calcularse en un perfil o en una superficie. Los parámetros de rugosidad del perfil son más comunes, en estos se toman los valores de altura Y que tienen los segmentos de una línea de corte. Dado que estos parámetros reducen toda la información de un perfil a un solo número, se debe tener mucho cuidado al aplicarlos e interpretarlos (“Surface Profile Explorer | Practical Coatings Science | Prof Steven Abbott,” n.d.).

- **Ra:** es la rugosidad media aritmética (promedio).

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i|$$

- **Rv:** es la profundidad máxima del valle.

$$R_v = \min_i Y_i$$

- **Rp:** es la altura máxima del pico.

$$R_p = \max_i Y_i$$

- **Rt:** es la altura máxima del perfil

$$R_t = R_p - R_v$$

3.1.2.2 Cenizas volantes de carbón

Las cenizas volantes son un residuo que se produce por la combustión del carbón pulverizado. Su aspecto es un polvo fino cuyas partículas poseen una forma esférica y son cristalinas, tienen propiedades puzolánicas y sus compuestos principales son el dióxido de silicio (SiO_2) y el óxido de aluminio (Al_2O_3). Para saber cómo se producen estos residuos se debe comenzar por enunciar el inicio del proceso de combustión del carbón, donde previamente el carbón es pulverizado en molinos, y –como se mencionó

en líneas anteriores— tanto si se cuenta en el proceso con combustibles secundarios o no, el carbón se introduce en el horno con una corriente de aire caliente a alta velocidad, y en suspensión es quemado con una temperatura mayor al punto de fusión de la mayoría de los minerales, es decir, se quema con una temperatura de 1.500 ± 200 °C. Ahora bien, en esta parte del proceso es donde se producen las partículas de ceniza, dado que la combustión de las partículas inorgánicas no se efectúa completamente.

Este no es el único tipo de residuo que se produce por el proceso de combustión del carbón. Las centrales termoeléctricas que utilizan el carbón como combustible para producir energía generan dos tipos de residuos que se diferencian por el tamaño de sus partículas y la proporción en la cual se encuentran. Uno de estos son las mencionadas cenizas volantes que constituyen el 80% del total de ceniza originada en las centrales térmicas y cuyo peso es aproximadamente el 30% de la masa de carbón consumida, por otra parte, también se encuentran las cenizas de hogar o escorias a las cuales les corresponde el porcentaje restante de ceniza producida, esto es, el 20%; la proporción en la cual se presentan estos tipos de residuos depende de varios factores, a saber, la configuración de la central térmica, el tipo de caldera empleado y las condiciones en las cuales se da el proceso de combustión. Las cenizas volantes son las partículas más finas y se obtienen a partir del proceso de precipitación mecánica o electrostática del polvo en suspensión que está comprendido en los gases que proceden de la combustión; mientras que las cenizas de hogar o escorias son las partículas más gruesas, que al caer al fondo se obtienen por arrastre con agua hasta los silos de almacenamiento provisional (Amahjour, 2000).

La composición química de las cenizas volantes fluctúa de acuerdo con los elementos químicos que componen el carbón, de manera que la proporción en la cual se presentan los elementos que componen las cenizas puede ser variable. En general se ha descrito que las cenizas presentan un mayor porcentaje de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxidos de hierro (Fe_2O_3), cal (CaO) y carbón sin quemar; por el contrario, los compuestos magnesita (MgO), óxido de azufre (SO_3) y alcalinos (Na_2O y K_2O) se encuentran en un menor porcentaje, esto es, el 5% en peso. Cabe anotar que hay elementos que se

encuentran en cantidades menores a la anterior, estos son: compuestos de titanio, vanadio, manganeso, fósforo, germanio, galio, etc.(Amahjour, 2000).

En cuanto a los usos de la ceniza volante, se tiene que el de más relevancia es la construcción de pavimento PCC, esto se debe a los beneficios económicos que aporta la sustitución del concreto por cenizas volantes, dado que en el proceso de construcción de pavimento PCC se utiliza una cantidad importante de concreto. También, actualmente se aprovechan como sustituto del cemento portland o adicción puzolánica para mejorar las durabilidad y resistencia de productos basados en concretos. Otras aplicaciones que se le dan a la ceniza volante es como material en bloques o ladrillos, y como relleno de minas (Amahjour, 2000).

3.1.2.3 Agentes para la suspensión.

Almidón

Después de la celulosa se tiene que el almidón es el polisacárido más abundante. Este compuesto tiene varios usos, lo que depende de las diferentes industrias en las cuales se utiliza, entre ellas se encuentran la alimenticia, la textil, la farmacéutica, la papelera y de adhesivos. Su participación en los procesos de estas industrias se debe a las características físicas y químicas que presenta este compuesto (Velasco, Luna, Mera, & Villada, 2008)

Alcohol polivinílico.

Este polímero sintético presenta propiedades que le permiten formar películas, como emulsionante y como adhesivo. Entre ellas se encuentra su resistencia a los aceites, las grasas y los disolventes, y altas propiedades de barrera para el oxígeno y los aromas; también presenta la característica de ser soluble en el agua. Por último, cabe anotar que el alcohol polivinílico es inodoro y no tóxico, y cuenta con una alta resistencia y flexibilidad (Ciro, 2014).

Carboximetilcelulosa.

La carboximetilcelulosa es una sal que tiene propiedades de solubilidad en el agua. Debido a su propiedad hidrofílica es propicia para la formación de películas, presenta alta viscosidad y un comportamiento adhesivo, entre otras características. Algunas de sus aplicaciones son: usos en detergentes, fluidos de perforación y en la industria papelería, esto cuando se produce en grados comerciales crudos sin refinamiento y en cantidades considerables. Por otra parte, otro de los usos que se le dan a esta sal es como aditivo alimenticio, cuando se produce en grados de pureza más altos (Bordallo López, 2014).

3.1.2.4 Láser CO₂

Como fuente para generar el rayo láser, en los láseres de CO₂ se utilizan varios gases que se encuentran mezclados; los pequeños, eficientes y fiables módulos semiconductores que están exentos de desgaste son los que generan la alta tensión que se necesita para que se produzca el estado de excitación del gas en el resonador. Este tipo de tecnología de CO₂ tiene diferentes usos, se emplea en diversos procesos que requieren cortar chapa gruesa, madera, acrílico, vidrio, papel, textiles, plásticos, cuero y piedra. Asimismo, se utiliza para la producción de chapa en distintos grosores (hasta 25mm) y piezas tubulares (Shoji, Nakamura, & Horiuchi, 1985).

3.1.2.5 Técnicas de caracterización.**Microscopia óptica.**

Dentro de la clasificación de los tipos de microscopios se encuentra el microscopio óptico, el cual, para producir la imagen, utiliza como fuente energía fotones del espectro visible. Respecto a la morfología de las superficies, se tiene que el método más favorable para su estudio es el empleo de los microscopios electrónicos de barrido o microscopios SEM, que contrario a los ópticos, a partir la interacción de un haz de electrones hacen

un barrido de determinada área sobre la superficie de la pieza observada, y de esa manera generan la imagen (Renau-Piqueras & Faura, 1994).

Microscopio electrónico de barrido

La microscopía electrónica de barrido o SEM es un tipo de microscopía con la que se logran obtener imágenes mediante un haz de electrones proyectado sobre la muestra a visualizar. Los electrones proyectados interactúan con los átomos de la muestra, esto produce variedad de señales que contienen información sobre la topografía de la superficie y la composición de la muestra. El haz de electrones es escaneado en un patrón de exploración de trama, y la posición del haz se combina con la intensidad de la señal detectada para producir una imagen. El SEM requiere usar equipos especializados ya que las muestras son observadas en vacío (Clavijo Penagos, 2013).

Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier

La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier o FTIR es una técnica utilizada para obtener un espectro infrarrojo de absorción o emisión de una sustancia en estado sólido, líquido o gas. En este se estudia la absorción o emisión de energía radiante originada por la interacción entre la radiación electromagnética y el material en estudio. El FTIR está basado en que las moléculas pueden rotar y vibrar en diferentes frecuencias. Los componentes de los enlaces químicos tienen movimientos vibracionales con frecuencias naturales dentro del rango de frecuencias del infrarrojo (Piqué & Vázquez, 2012).

Pin on disk

El tribómetro pin on disk esta compuesto por un pin también conocido como perno que está encargado de aplicar una fuerza para desgatar una probeta que se ubica sobre un disco giratorio, el disco gira a diferentes revoluciones para que la superficie se desgaste de manera uniforme en el recorrido del pin sobre la probeta. También cuenta con una

celda de carga que permite conocer el valor de la carga que es aplicada sobre la probeta. Mediante un transductor de fuerza accionado por una varilla de longitud regulable, se le transmite una fuerza tangencial ejercida sobre la bola en el punto de fricción (Gómez Botero, Esteve Pujol, & Universitat de Barcelona. Departament de Física Aplicada i Òptica., 2007).

Espectroscopía de fluorescencia de rayos x

La espectrometría de rayos X es una técnica que, mediante la emisión secundaria o fluorescente de rayos x, permite detectar y cuantificar la composición de la muestra de material. Esta técnica se caracteriza por el hecho de que la radiación resultante del análisis se descompone en sus diferentes longitudes de onda o espectros para el análisis de los elementos o compuestos que contiene la muestra. Los rayos X fluorescentes tienen longitudes de onda mayores que las de los rayos X primarios, estos son característicos de material irradiado o radiador, su emisión siempre va acompañada de fotoelectrones y las longitudes de onda de estos rayos son independientes de las longitudes de onda de radiación primaria (Fabian, Rees, Stella, & White, 1989).

2. METODOLOGÍA

2.1 Caracterización de cenizas volantes

Las cenizas volantes fueron obtenidas en la empresa Fabricato, son el residuo resultante de la quema de carbón mineral para obtener calor para sus diferentes procesos industriales. En primera instancia, era importante caracterizar las cenizas volantes, esto permitiría relacionar de manera adecuada los diferentes cambios que se presentaran en la superficie mediante el tratamiento.

Se caracterizaron las cenizas volantes mediante un microscopio electrónico de barrido o SEM, este permite no sólo visualizar con gran aumento las partículas de las cenizas, sino que, al usar un haz de electrones en vez de un haz de luz, se logran obtener imágenes detalladas que permiten observar la morfología de las partículas de la ceniza. Esto se realizó

en el laboratorio de la Universidad EIA con el equipo Phenom Prox. Lo primero que se hizo fue depositar las cenizas sobre un porta muestras, este posee un adhesivo que evitaba que se desprendiera las cenizas, luego se sopló el porta muestras con nitrógeno gaseoso para retirar los excesos de ceniza y otras partículas, dejando solo una fina capa. El porta muestras se introduce en el equipo que empieza a generar el vacío y emite el haz de electrones para proyectar sobre las cenizas si se logra lograr obtener las imágenes de estas, mediante el software se puede desplazar por toda la capa de cenizas, al igual que permite hacer acercamientos y sobre la muestra.

Dado que se pretendía formar un revestimiento con las cenizas era propicio caracterizarlas químicamente de modo que se pudiera realizar un mejor análisis sobre lo que ocurre con las probetas tratada, para esto se utilizó el equipo FT-IR Spectrometer. Para esta caracterización se usó el mismo porta muestras usado en el microscopio SEM. Debido a problemas con el software no se pudo obtener las imágenes para poner las en este informe, aun así, se logró observar qué las cenizas eran altas en silicio, aluminio y oxígeno.

2.2 Preparación de suspensión

En proyectos actuales, maquinas CNC especializadas depositan material en polvo a la vez que irradian con el láser, lo que funde el material instantáneamente sobre las piezas de trabajo. Dado que no se cuenta con esa tecnología lo que se busca es separar estos pasos en dos tiempos; depositar el material primero y luego irradiarlo. En este numeral se describe la metodología llevada a cabo para la obtención de la suspensión química que permite ser depositada adecuadamente sobre las probetas de acero.

Una vez obtenidas las cenizas volantes se realizó la suspensión para recubrir las probetas, para ello se probaron soluciones de cenizas volantes con agua adicionándole modificadores con diferentes concentraciones para que adquiriera las características que permitieran un buen recubrimiento. Las múltiples soluciones obtenidas se probaron en un mismo sustrato para saber cuál obtenía la mejor adherencia y mojabilidad de la superficie, es decir que formara un recubrimiento continuo y uniforme sin la presencia de escurrimientos, grumos, ni burbujas.

Fundamentalmente, las características que se requerían para la suspensión eran:

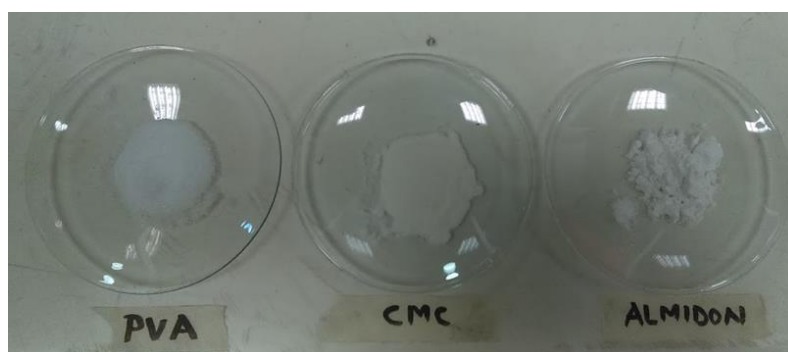
- Homogeneidad: dado que la suspensión es una mezcla de líquido con partículas sólidas (cenizas volantes), uno de los objetivos era que la mezcla permaneciera homogénea, sobre todo procurando que las partículas no se precipitaran cuando la suspensión estuviera en reposo
- Uniformidad: la suspensión debía permanecer uniforme en todo momento, sin la presencia de burbujas o grumos.
- Viscosidad: era de importancia controlar la cantidad de suspensión depositada, para ello se buscó una viscosidad que permitiera depositar sin que tendiera a regarse o escurrirse por fuera de las probetas.
- Adherencia: por último, la suspensión debía generar una adherencia sobre las probetas de modo que al secarse quedara una capa fija que no se removiera fácilmente.

Para lograrlo, se probaron tres agentes aglutinantes los cuales dieran a una suspensión de agua y cenizas volantes las características deseadas. Los aglutinantes son PVA (alcohol polivinílico), CMC (carboximetilcelulosa) y almidón de yuca.

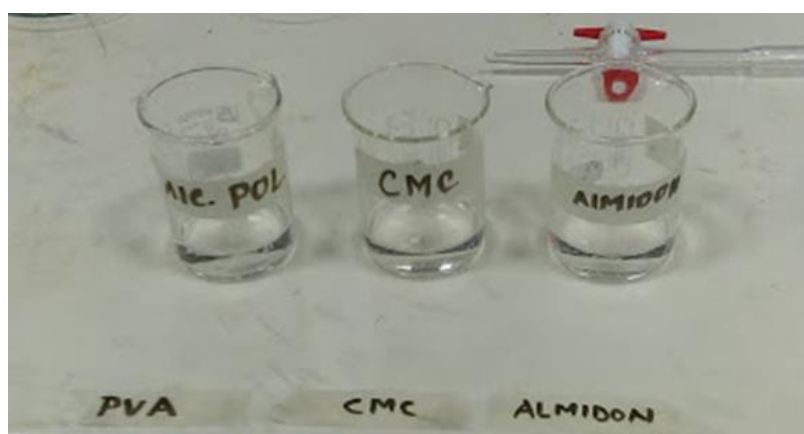
Para observar el comportamiento de los agentes se plantaron pruebas preliminares: en una balanza analítica se pesaron dos gramos de cada aglutinante en 20 ml de agua (ver figura 2).



(a)



(b)



(c)

Figura 2. Preparación de primeras pruebas de suspensión: (a) pesaje de aglutinantes, (b) 2g de cada aglutinante y (c) beakers para cada aglutinante

Luego se agregaron los aglutinantes al agua y se procedió a agitar la mezcla con un agitador magnético por cinco minutos (Figura 3).

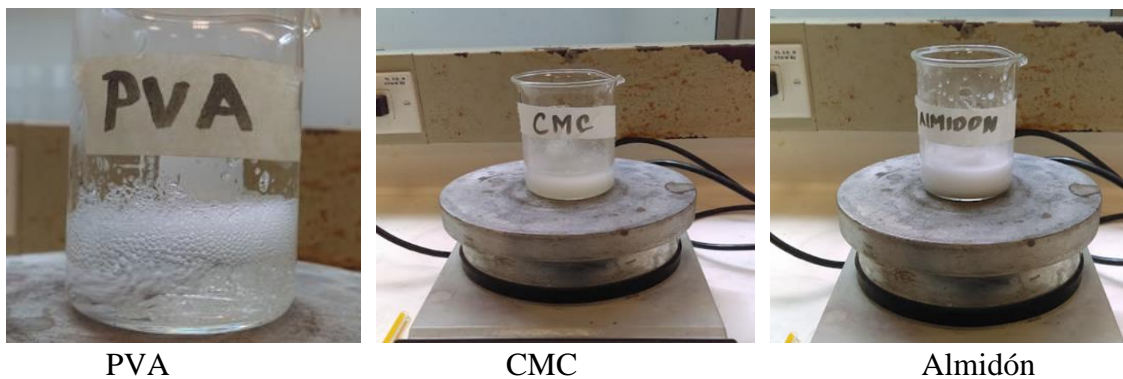


Figura 3. Mezclas agitándose

Con base en las observaciones obtenidas, se realizaron nuevas pruebas, el enfoque de estas era mejorar la proporción aglutinante/agua. También, se adicionaron 2g de ceniza volantes (Figura 4) para empezar a observar el comportamiento de esta en la suspensión.

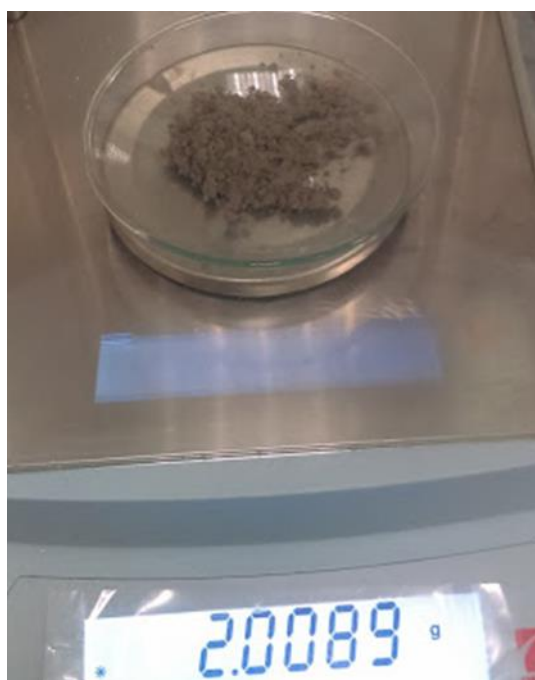


Figura 4. Pesaje de cenizas volantes

Observado el comportamiento de las cenizas en la suspensión, se procede a realizar pruebas finales, buscando las características anteriormente mencionadas y procurando la mayor cantidad de cenizas volantes.

Cabe mencionar que también se realizaron pruebas en aceite de linaza y en silicato de sodio; estos fueron usados como medios líquidos para depositar las cenizas, es decir sin el uso de agua, tampoco se agregaron agentes aglutinantes, ya que mediante las propiedades cada sustancia se esperaba lograr las características requeridas. Ambas pruebas se realizaron depositando 10g de cenizas volantes en 80 ml de cada sustancia.

2.3 Probetas de acero

Inicialmente, se obtendrán tres probetas de una placa de acero de bajo carbono (AISI-SAE 1020 o ASTM A36), normalmente estas placas de acero tienen una capa de óxido conocido como calamina que se forma durante el proceso de fabricación. Se estudiará el efecto de esta calamina en el recubrimiento, por lo que la primera probeta solo será limpiada con desengrasante. Las otras probetas serán sometidas a abrasión: una de ellas se le removerá la calamina con un esmeril, mientras que con la otra se usaran lijas, esto para estudiar la incidencia de la rugosidad en el recubrimiento, a estas probetas igualmente se le aplicará limpiadores y desengrasantes. A estas probetas se les realizará microscopía óptica de alta resolución y se determinará su rugosidad con el objetivo de caracterizar las superficies y la incidencia de sus propiedades iniciales en el resultado final.

Para preparar las probetas a recubrir se hace uso de un acero 1020. Este acero de bajo carbono se encuentra disponible en la universidad EIA. Estas consisten en placas de 3.8x12 cm con un espesor de 0.6 cm.



Figura 5. Placa de acero 1020

Para las tres probetas de acero con calamina solo se limpian estas placas con desengrasante, se espera ver si esta capa superficial del acero logra interactuar con la suspensión bien sea ayudando a la adherencia o a aportar en el cambio de características superficiales.

Para las siguientes tres probetas se esmerilo un lado de la placa con la piedra esmeril oxido de alúmina grano A36, el propósito de esto es remover la calamina para evaluar el efecto del láser cladding en el acero sin esta capa de oxido, también se evaluará la incidencia de la rugosidad en el láser cladding con el rayado que deja la piedra esmeril.



Figura 6. Placa de acero esmerilada

Para las tres últimas probetas también se removió la calamina y para evaluar el efecto en de la técnica en materiales poco rugosos se procedió a realizar un lijado con diferentes hojas de lija y agua para darle un acabado de espejo a la superficie de la probeta: se usaron hojas 50, 80, 100, 120, 150, 180, 220, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 1200 y 1500; empezando por la de menor numero, se lijaba el lado de la placa solo en una orientación (vertical u horizontal) y con la siguiente hoja se lijaba en la orientación contraria hasta que las líneas del lijado anterior no fueran visibles, este proceso se realizo pasando de hoja en

hoja, intercalando las orientaciones y aplicando agua para tener mayor efecto. Se puede ver el resultado en la figura 7.



Figura 7. Placas de acero lijadas a espejo.

Las placas se cortaron en tres cuadrados de 3.8 cm de lado y se procedió a realizar microscopia de alta resolución para observar mas de cerca las diferencias entre las superficies y así lograr un grado de conocimiento previo de su morfología y así poder asociarla con la morfología posterior al revestimiento.

Las imágenes de microscopia se obtuvieron en el laboratorio de biomateriales de la Universidad EIA, allí se cuenta con el equipo Nikon Eclipse LV100, este microscopio cuenta con aumentos ópticos de x5, x10, x20, x50 y x100, también cuenta con un vidrio polarizador a fin de permitir observaciones en diferentes longitudes de onda. Mediante un conjunto de vidrios y la posición de estos en el microscopio, se logra obtener diferentes efectos de color de la luz que proyecta el microscopio, que a su vez permite variar la intensidad de esta. Este microscopio tiene una cámara integrada una cámara integrada que mediante el software NIS Elements D 3.1, permite obtener capturas de lo observado.

Para hacer uso del microscopio se inserta la USB del microscopio (esta es una USB especial para que el software funcione), después se procede a prender el visualizador de la cámara del microscopio y con esto se pasa a iniciar el software. Oprimiendo la tecla “+” se empieza a ver en pantalla lo que se está observando en el microscopio, para proceder hacer capturas basta con oprimir la tecla “Y”. Mediante el software es posible rotular las imágenes según se requiera. Es importante señalar en que aumento se está trabajando. Se recibió la recomendación de, antes de capturar las imágenes, oprimir “F11”, esto abrirá una ventana de configuraciones, allí se pasa de un control automático a uno manual y se ajusta la velocidad, para mover la pieza de trabajo sin retardo en la imagen mostrada en pantalla, y el color, para observar los colores reales de la muestra.

Este mismo microscopio permite hacer caracterizaciones de rugosidad para ello sólo es requerido prender el equipo contiguo hala al microscopio que se encuentra contiguo al microscopio. Debido a la diferencia de altura, en la vista del microscopio, algunas zonas se ven nítidas mientras que otras se ven borrosas. Lo primero que se hace para la caracterización es enfocar la parte más baja del “plano” de la imagen del microscopio, luego se enfoca la parte más alta, estableciendo cuanto es el delta de altura (debido a que es rugosidad, normalmente es en micras). En el mismo software se cuenta con la opción de construir imágenes 3D, representado con una mariposa que aparece en la parte izquierda del interfaz, al darle click, se abre una ventana, en ella se le da la opción de TOP para que establezca la altura tope y se introducen el valor del tope restándole el delta de altura anteriormente calculado para conocer la altura desde donde se desplazara la cámara (Se debe tener cuidado con introducir el valor de la altura correcto, si se introduce un valor muy bajo, el lente podría chocar con la pieza y dañarse), en la misma ventana se determina cuantas fotos se han de sacar y el mismo software calcula de a cuanto queda cada incremento (por recomendación, se sacan 20 fotos ya que con estas los valores se estabilizan). Una vez sacada las fotos el software las sobrepone una sobre la otra y con esto se logra obtener una imagen 3D de la vista de la probeta en el microscopio.

Se procede a realizar un corte sobre las imágenes 3D, el software calcula la altura de cada micra del corte y con ello una altura para cada superficie. Cabe anotar que el corte es una línea recta que puede tener cualquier posición y ángulo en el plano XY, los cortes se

realizaron en donde se apreciaba visualmente mayor irregularidad. Mediante el software se tiene una gráfica cuyos valores pueden ser exportados a Excel para su posterior análisis.

2.4 Recubrimiento de las probetas

Las probetas pasaron a ser recubiertas. Se estudio el efecto de la cantidad de cenizas depositadas sobre la superficie, por lo que se recubrieron probetas con la misma superficie, pero diferente cantidad de cenizas. Con las superficies caracterizadas se procedio a relizar el recubrimiento de las probetas con ayuda de una pipeta y un propiteador.



Figura 8. Depositando la suspensión sobre las probetas de acero.

Las capas se fueron depositando en volúmenes de aproximadamente 3 ml. Se deposito la suspensión de tal modo que las gotas cubrieran toda la superficie de una de las caras de cada probeta (ver figura 8), en aquellos puntos que no quedaron cubiertas, se utilizó un agitador de vidrio para que las probetas quedaran recubiertas uniformemente. Esto se realizó con ayuda de un agitador de vidrio en el cual no quedaba una cantidad significativa de suspensión después de entrar en contacto con ella. Las gotas se unían fácilmente debido a las características conseguidas en la suspensión mediante el agente modificador.

Posteriormente se llevaron las probetas al horno a 70 °C por 90 minutos a la espera de que se evaporara el agua y solo quedara en la superficie una capa de ceniza volante.

Se estimó el espesor promedio de la capa de suspensión depositada mediante el cálculo mostrado a continuación:

$$(3.8\text{cm})^2 = 14.44 \text{ cm}^2 \quad (1)$$

$$\frac{3 \text{ ml}}{14.44 \text{ cm}^2} = 0.21 \text{ ml/cm}^2 \quad (2)$$

$$\frac{10 \text{ g}_{\text{ceniza}}}{100 \text{ ml}} = 0.1 \text{ g}_{\text{ceniza}}/\text{ml} \quad (3)$$

En la ecuación 1 se calcula la superficie recubierta de cada probeta. En la ecuación 2 se tiene la cantidad de suspensión por unidad de área. En la ecuación 3 se calcula la cantidad de ceniza por unidad volumétrica de suspensión. Se multiplica 2 por 3 para conocer la cantidad de ceniza que se deposita por unidad de área en cada capa.

$$0.21 \frac{\text{ml}}{\text{cm}^2} * 0.1 \frac{\text{g}_{\text{ceniza}}}{\text{ml}} = 0.021 \text{ g}_{\text{ceniza}}/\text{cm}^2$$

Para evaluar el efecto de la cantidad de suspensión depositada en las probetas de acero se tomaron seis probetas (dos de cada tipo de superficie) y se les dio una segunda capa, igual a la anterior, este proceso se realizó una vez con otras tres probetas, dejando así tres probetas por superficie con una, dos y tres capas de la suspensión. Con el cálculo de masa por área de cenizas volantes depositada anteriormente hecho, se tiene que, para las probetas de dos y tres capas, respectivamente, la cantidad de masa por unidad de área de cenizas volantes depositada fue:

$$2 * 0.021 \text{ g}_{\text{cenizas}}/\text{cm}^2 = 0.042 \text{ g}_{\text{cenizas}}/\text{cm}^2$$

$$3 * 0.021 \text{ g}_{\text{cenizas}}/\text{cm}^2 = 0.063 \text{ g}_{\text{cenizas}}/\text{cm}^2$$

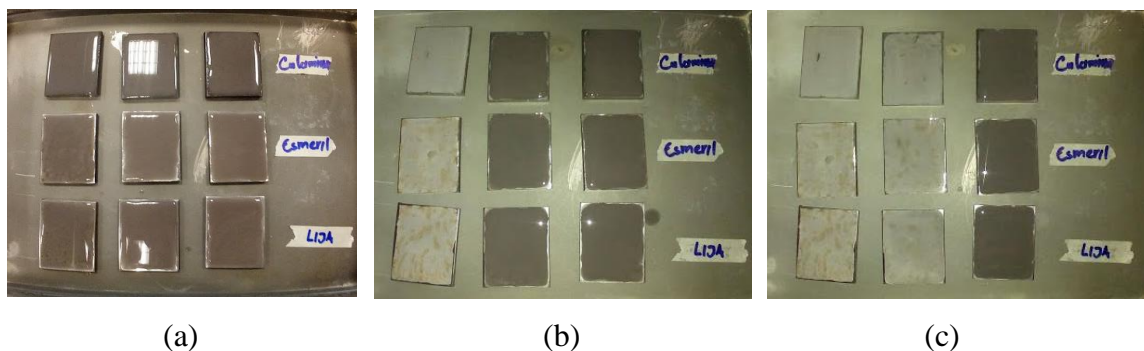


Figura 9. Probetas recubiertas con: (a) una capa, (b) dos capas y (c) tres capas de suspensión.

2.5 Diseño de las condiciones de irradiación

Las probetas pasan a ser irradiadas con el láser CO₂, con matrices (densidad de energía) del láser predeterminadas, se espera obtener diferentes marcados sobre la probeta. La probeta pasa a ser enjuagada, observando detenidamente que marcados fueron removidos y que marcados persisten, determinando así cuales son las matrices que realmente están causando una modificación sobre el material.

Lo que se buscaba al irradiar la probeta recubierta es que las cenizas se fundan y solidifiquen sobre el material y de este modo modificar las propiedades superficiales de este. En este numeral se describe el proceso experimental para obtener los parámetros de densidad de energía para el irradiado laser de la probeta. Para la irradiación laser se contó con la máquina de corte y grabado laser Rujie RJ – 1590 que se encuentra disponible en la Universidad EIA. La cortadora laser tiene una potencia de 80 KW y como su nombre lo indica puede cortar y pirograbar, esta última fue la función usada para el desarrollo de este trabajo de grado, cabe resaltar que, por recomendación del fabricante, el laser no se debe usar en su máxima potencia; la recomendación es que el máximo sea 75% lo que

corresponde a 60 KW. A la hora de calcular la densidad de energía es importante conocer el diámetro del haz laser que para la Rujie RJ – 1590 es de 0.5 mm.

Se diseño una matriz de densidad de energía con velocidades entre 100 y 220 mm/s con incrementos de 40 mm/s. Para la potencia se usaron valores entre 20 y 50 KW con incrementos de 10 KW (ver figura 10).

		Potencia (KW)			
		20	30	40	50
Velocidad (mm/s)	220				
	180				
	140				
	100				

Figura 10. Primera matriz de densidad de energía.

Los cuadros en la matriz son cuadrados de 5 mm de lado, sobre toda el área de cada cuadrado se irradia la misma densidad de energía. Con esto se procedió a marcar cada una de las probetas.

Según los resultados obtenidos, se procedió a elegir los valores que se observaban tenían mejores aspectos, sobre estos valores la matriz se amplió con el propósito de lograr mejores irradiados sobre las probetas, y así conocer los mejores parámetros de irradiación.

En este numeral también se aplicó microscopia de alta resolución sobre las probetas marcadas con las matrices ampliadas, tal cual se describió en el numeral 2.3, con el propósito de lograr observar a detalle los resultados obtenidos.

Ha estas probetas hubiera sido propicio realizar espectroscopía de fluorescencia de rayos x, mediante esta técnica se podría conocer a detalle la composición química del revestimiento formado, ya que se podía dar el caso en que el efecto del láser penetra de tal manera que no solo vitrifico el recubrimiento de cenizas volantes, sino que también fundió parte de la superficie. Esto es importante para saber si los clústeres observados

eran por el recubrimiento o solo por el efecto del láser en la superficie de las probetas. Este ensayo no se pudo realizar por cuestiones de tiempo y monetarias. Aun así, se teoriza que los clústeres están formados, al menos en su mayoría, por el recubrimiento debido a que la longitud de onda del láser CO₂ no es capaz de penetrar sobre las chapas de acero.

2.6 Ensayo tribológico

Una vez seleccionados las condiciones del revestimiento, superficie y parámetros de irradiación adecuados, se procedió a elaborar las probetas para realizar ensayos de tribología, para ello se prepararon las superficies seleccionadas y se procedió a cortar en cuadrados de 2.5 cm de lado. También se prepararon probetas sin tratar afín de realizar igualmente ensayos con estas para la posterior comparación con las muestras tratadas y evidenciar los cambios en las características superficiales.

Debido al cambio del área de las probetas, se usa la razón de volumen de recubrimiento sobre el área a recubrir anteriormente calculada para multiplicarla por la nueva área y así conocer la cantidad de suspensión a depositar por cada capa, dando por resultado:

$$0,21 \text{ ml/cm}^2 * 6,25 \text{ cm}^2 = 1,30 \text{ ml}$$

Lo siguiente fue recubrir las probetas e irradiarlas según los parámetros seleccionados para posteriormente realizar el ensayo de tribología.

Todos los ensayos tribológicos se realizaron en un tribómetro pin-on-disk, acorde a los lineamientos de la norma ASTM G99, controlando y registrando las condiciones ambientales de laboratorio 50 ± 5 % de humedad relativa y 22 ± 2 °C.

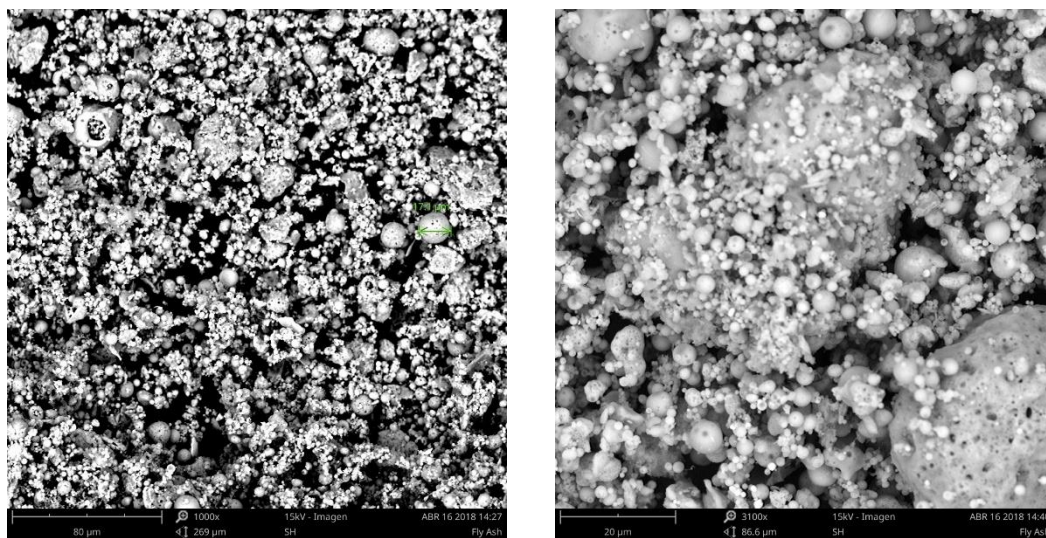
Los parámetros empleados para las pruebas tribológicas fueron: carga de 2 N, velocidad 50 rpm, radio de huella de 2 mm, contra cuerpo de alúmina con un diámetro de 6 mm, tiempo de 10 min y bajo atmósfera del laboratorio. Una vez finalizado cada ensayo tribológico, las huellas y el contra cuerpo fueron observados al microscopio óptico. Al inicio de cada prueba puede haber un cambio muy brusco que tiene que ver con que entre

las superficies se empiezan a limar asperezas, rugosidades, o películas contaminantes presentes.

En este numeral también se realizaron caracterizaciones de rugosidad, tanto a las probetas revestidas como a las sin revestir a fin de comparar los resultados. La caracterización de rugosidad se hizo tal y cual se describió en el numeral 2.3.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Caracterización de cenizas volantes



x1000

x3100

Figura 11. Imágenes obtenidas por SEM

En la figura 11 se observa a detalle la topografía de las cenizas volantes, se evidencia que, aunque muchas partículas son circulares, también se encuentran otras con formas no tan definidas, además se presenta una gran variación de los tamaños

Debido a la variabilidad de tamaños, hubiera sido propicio reducirlos aplicándoles fuerza mediante un matraz, desafortunadamente, la universidad no contaba con uno y por cuestiones de tiempo fue difícil adquirirlo.

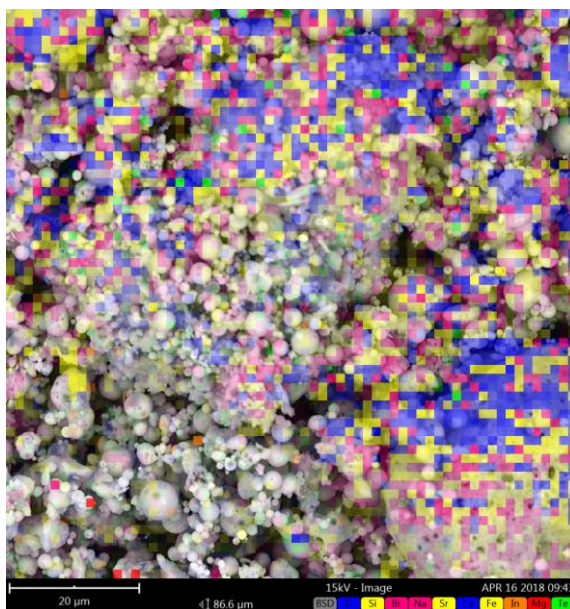


Figura 12. Imagen de mapeo obtenida por FTIR

Mediante la caracterización con el equipo FTIR, se obtuvo la composición química de las cenizas volantes.

Tabla 1. Elementos presentes en las cenizas volantes

Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
O	69.90	43.03		
Si	15.26	16.48	Si	28.93
Br	8.94	27.48	Br	48.24
Na	1.24	1.09	Na	1.92
Sr	1.19	4.00	Sr	7.02
Ca	1.11	1.71	Ca	3.00
Fe	1.02	2.20	Fe	3.86
In	0.65	2.88	In	5.05
Mg	0.58	0.54	Mg	0.95

FOV: 86.6 μm , Mode: 15kV - Image, Detector: BSD Full, Time: APR 16 2018 09:43

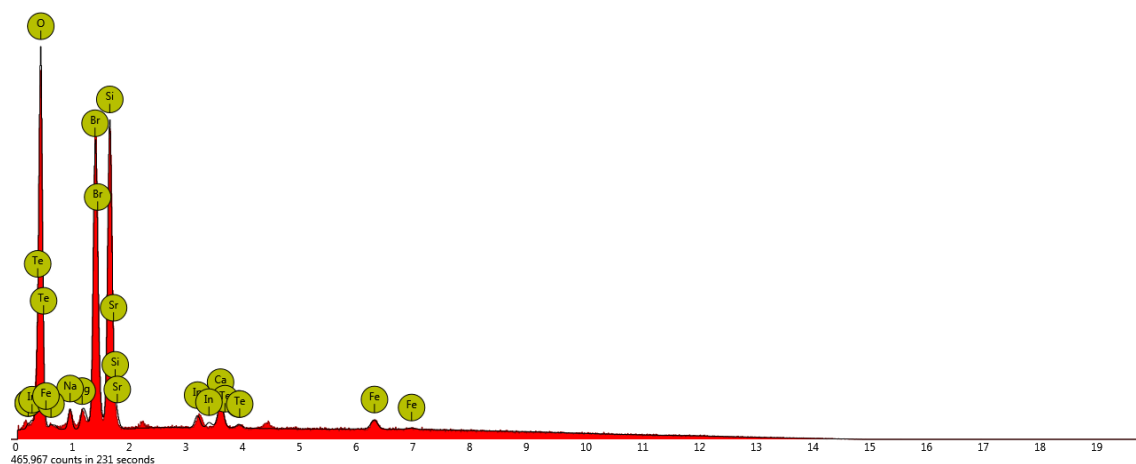


Figura 13. Concentraciones de los diferentes elementos presentes en las cenizas volantes.

Mediante la table 1 y la figura 13, se evidencia, que las cenizas tienen una gran concentración de oxígeno y después de sílice, que una vez se irradiada se espera vitrifique sobre las probetas generando un revestimiento duro y frágil.

3.2 Preparación de la Suspensión

Al realizar las pruebas preliminares los resultados para cada agente modificador fueron los siguientes:

- PVA: a primera vista lo que más resalto es que no hubo una mezcla homogénea, en la Figura 14 se observa que el alcohol polivinílico se hidrato y solo formo aglomeraciones.

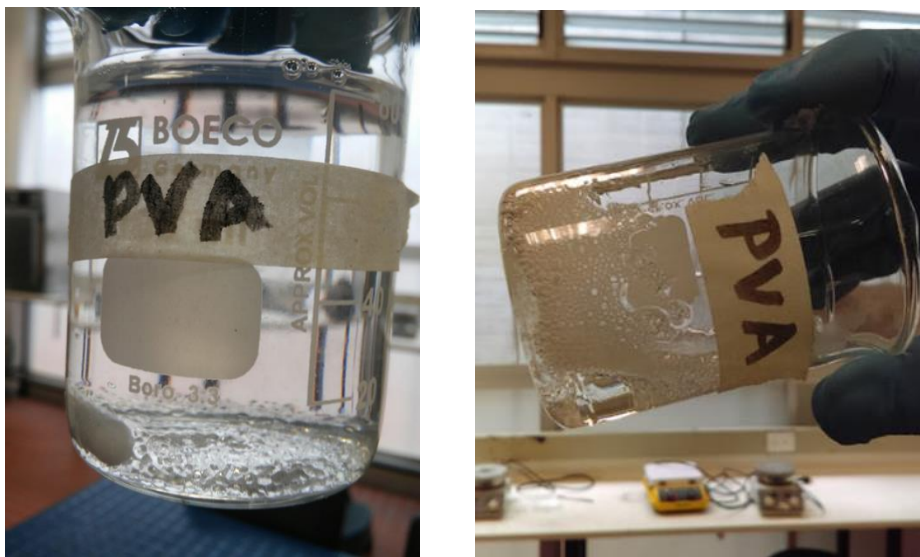


Figura 14. Resultados PVA

- CMC: el efecto del CMC fue inmediato, a los 10 segundos el agitador dejo de girar debido a que la mezcla se hizo altamente viscosa, como se observa en la Figura 15, la mezcla ni siquiera fluye y permanece sin deformarse si no se le aplica ninguna fuerza.

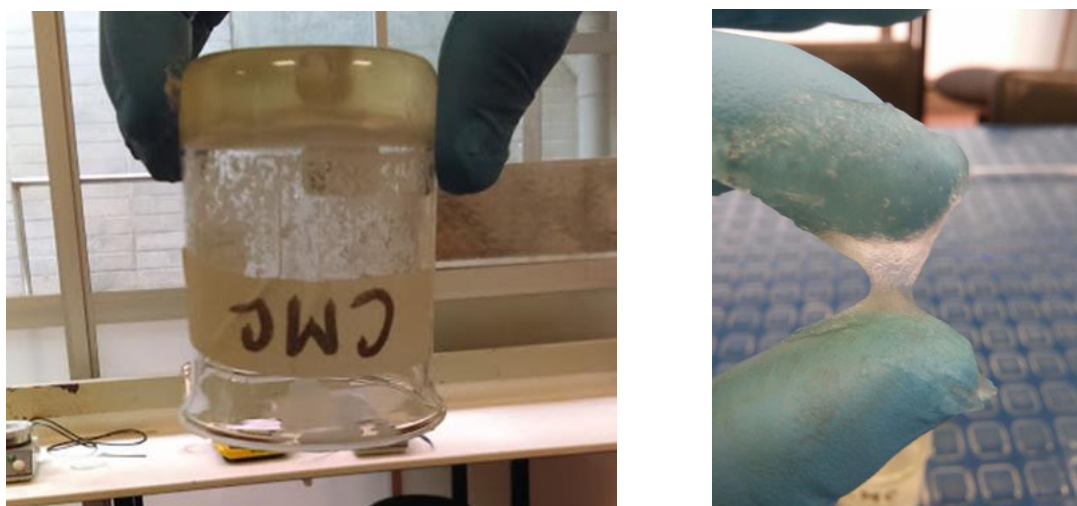


Figura 15. Resultados CMC

- Almidón: no genero mayores cambios en el agua en cuanto a las características deseadas, después de estar en reposo este procedió a precipitarse. En la Figura 16 se aprecia que el almidón se encuentra en el fondo.



Figura 16. Resultados Almidón

Tabla 2 Resumen de resultados de agentes aglutinantes.

	Homogeneidad	Uniformidad	Viscosidad	Adherencia
PVA	x	Presencia de grumos	x	x
CMC	✓	x	Muy alta	✓
Almidón	x	✓	x	x

Por los resultados obtenidos, el PVA como el almidón mostraron no cumplir con los requerimientos de la suspensión, por lo cual se descartaron, por otro lado, el CMC arrojó buenos resultados en homogeneidad y adherencia, pero aun requería ajustar la proporción con el agua que permitiría llegar a una buena suspensión.

La siguiente prueba se realizó depositando 1g de CMC en 100 ml de agua, esperando que, en esas proporciones, la viscosidad no fuera tan alta y la suspensión quedara mucho menos espesa. De nuevo la reacción del CMC con el agua fue inmediata, la suspensión quedó altamente viscosa, pero, positivamente, la ceniza no se precipitaba. Esta nueva prueba cumplía con tres de las cuatro características buscadas para la suspensión química.



Figura 17. Segunda prueba de suspensión, 1g de CMC y 2g cenizas volantes

La suspensión era muy parecida a un pegante vinílico para maderas y papel; la foto mostrada en la figura 17 fue tomada después de introducir un agitador de vidrio en la mezcla, como se logra ver, parte de la suspensión quedo pegada a esta y requería aplicar una fuerza externa para removerla. Esto era indeseable por la dificultad que esto representaba al momento de depositar la suspensión, por ello se procedió a realizar una nueva prueba, esta vez con 0.2 gramos de CMC (20% de lo anteriormente usado). Viendo que la ceniza interactuó adecuadamente con el CMC, se optó por incrementar la cantidad de esta a 10g. Con esto se obtuvo lo siguiente (figura 18):

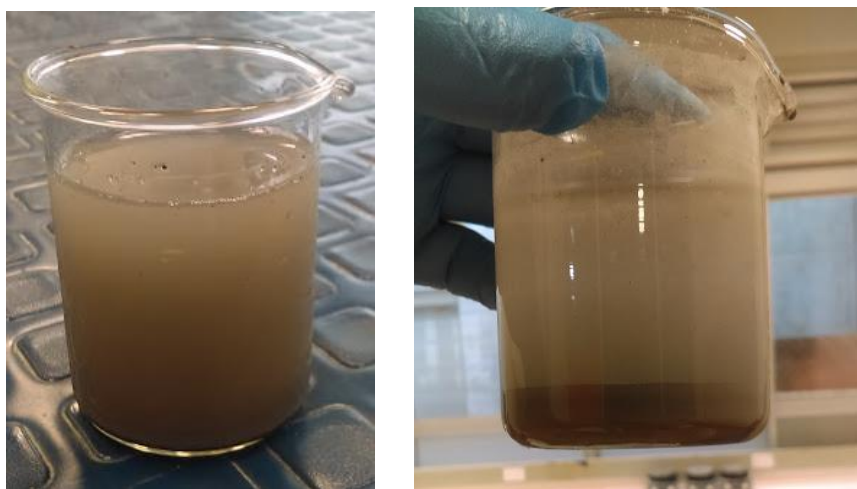
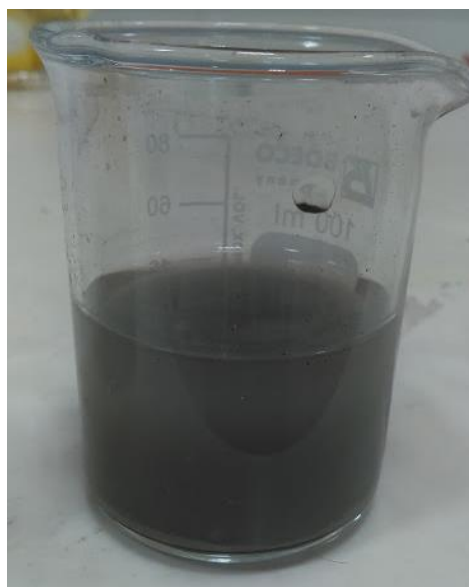


Figura 18. Tercera prueba de suspensión, 0.2g CMC y 10g de cenizas volantes

Aunque la suspensión ganó adherencia, no era lo suficientemente viscosa y perdió homogeneidad. En la figura 19a se logra observar que parte de la ceniza se precipitó, esto ocurrió después de un día entero en reposo. Por lo mismo se realizaron dos pruebas más con 0.3 y 0.4 gramos de ceniza volantes.



(a)



(b)

Figura 19. Cuarta prueba de suspensión 10g de ceniza volante y: (a) 0.3g de CMC y (b) 0.4g de CMC

Ambas suspensiones presentaban mayor viscosidad y la mezcla se mantenía homogénea después de un día entero en reposo. Examinando las suspensiones, se evidenció que la de 0.4g de CMC requería que se aplicara más fuerza que la de 0.3g, esto generaba problemas de control de la cantidad de suspensión que se depositaba, por ello la suspensión de 0.3g de CMC con 10g de ceniza volante fue la elegida para continuar con este trabajo.

Como se mencionó, se realizaron pruebas adicionales en aceite de linaza y en silicato de sodio. La suspensión obtenida mediante el aceite, tenía las características requeridas, debido a esto se decidió realizar una prueba como recubrimiento para las probetas. Por otro

lado, la suspensión de silicato presento precipitación de la cenizas, y por lo mismo se descartó inmediatamente (figura 20).

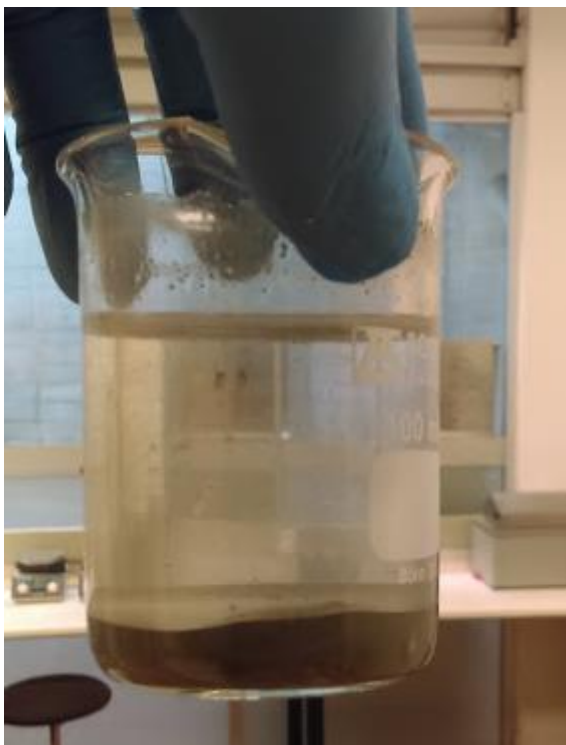
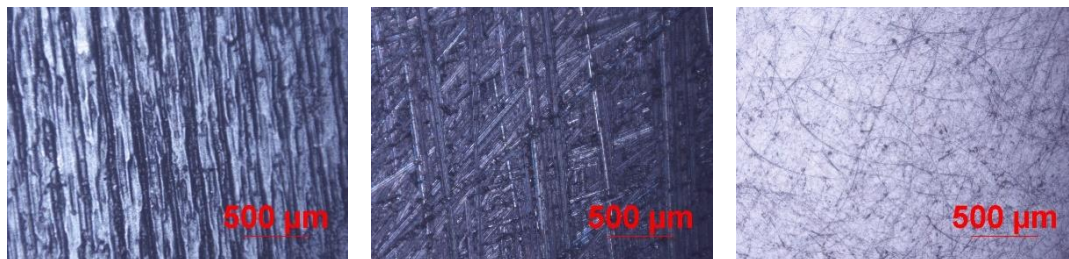


Figura 20. Suspensión con silicato de sodio

3.3 Probetas de Acero

Los resultados obtenidos en este numeral corresponden a las imágenes obtenidas por microscopia óptica y la caracterización de la rugosidad de las superficies de las probetas.





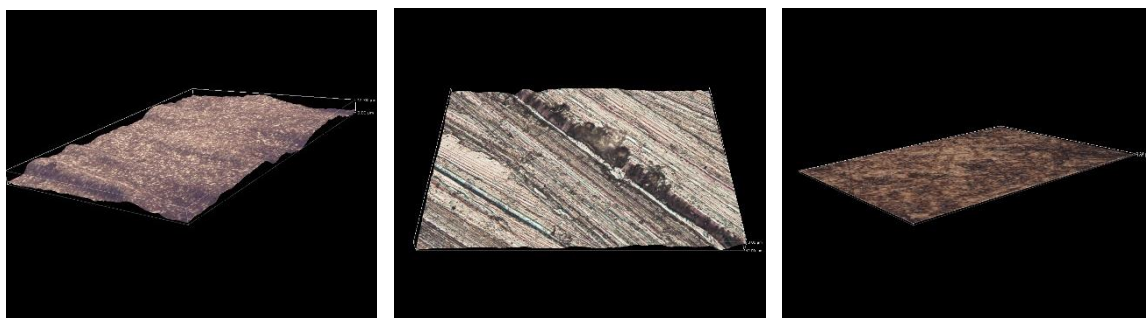
Calamina

Esmerilada

Lijada a espejo

Figura 21. Imágenes obtenidas por microscopia óptica de las superficies de acero.

En la figura 21 se logra observar a mayor detalle la morfología de las superficies. La superficie de calamina presenta un patrón aproximadamente uniforme, siendo los valles de tamaño similar y con la misma orientación, para los análisis que se hagan sobre esta superficie será importante considerar su rugosidad. La superficie esmerilada presenta rayas en varias direcciones lográndose ver unas rayas más profundas que otras. Finalmente, la superficie lijada, aunque con marcas visibles, no tiene una única orientación y sus valles pareciesen ser poco profundos.

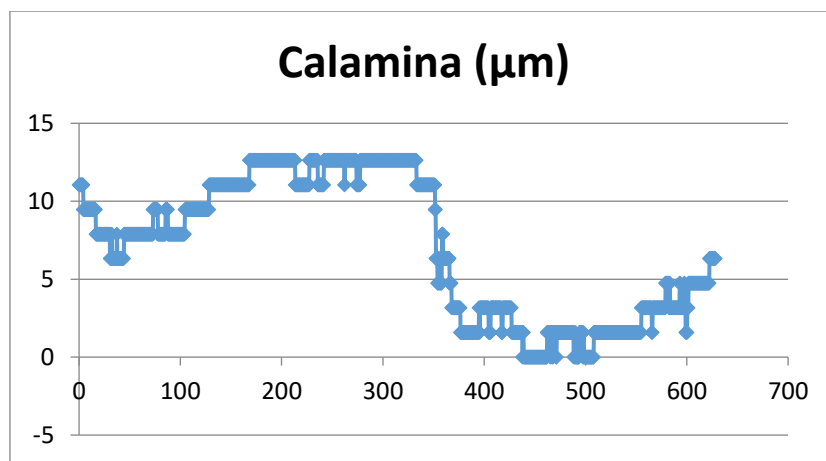


Calamina

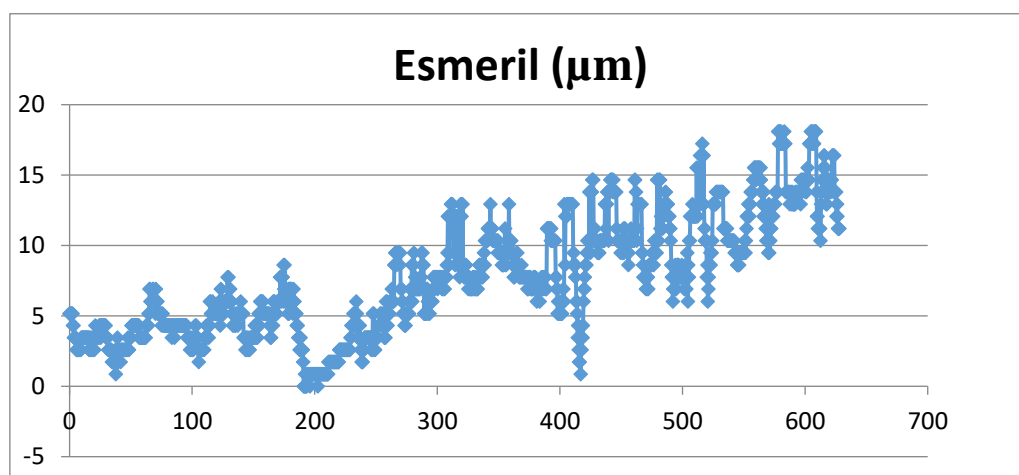
Esmerilada

Lijada a espejo

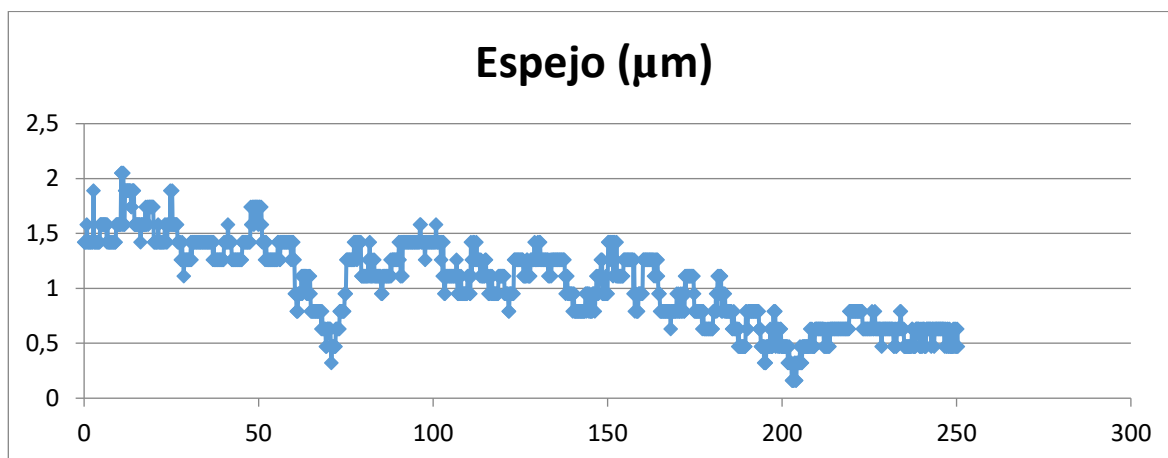
Figura 22. Imágenes 3D de las probetas con aumento x100.



(a)



(b)



(c)

Figura 23. Ensayo de rugosidad, donde eje X es el avance sobre la superficie de la probeta y el eje Y es la variación de altura de la superficie, ambas medidas en micras.

En la figura 23 se muestra los resultados de los ensayos realizados, además los valores que se tomaron fueron R_a , que es la rugosidad media o el promedio y R_t que es la distancia entre el punto más alto y el punto más bajo.

- La superficie de calamina presento valores de $R_a = 7.07\mu\text{m}$ con un $R_t = 12.63\mu\text{m}$. El tener un R_a cercano a la mitad del R_t indica que los valles son muy parecidos en su profundidad.
- La superficie esmerilada presento valores de $R_a = 7.66\mu\text{m}$ con un $R_t = 18.10\mu\text{m}$. Esto indica que la superficie del acero presenta una rugosidad similar a la de la superficie de calamina, pero con picos más elevados
- La superficie lijada a espejo presento valores de $R_a = 1.04\mu\text{m}$ con un $R_t = 1.89\mu\text{m}$, esto significa que la superficie es aproximadamente uniforme en su rugosidad y la profundidad de sus valles son significativamente inferiores al de las anteriores superficies.

En resumen, la superficie de calamina es muy uniforme en cuanto a su rugosidad, los valles y los picos presentan profundidades y alturas similares respectivamente. La esmerilada presenta valles de profundidad similar, pero en cuanto sus picos, algunos son mala altos que la media. En estas superficies, con estos, se esperaba que se generara el suficiente enganche mecánico con el revestimiento. La superficie espejo al igual que la de calamina es uniforme y como se esperaba tiene un valor bajo de esta, se esperaba evaluar que, si bien no había enganche, si la irradiación laser penetraba lo suficiente para fusionar el recubrimiento con la superficie.

3.4 Revestimiento de probetas

Después de que las probetas se secaron en el horno y se dejaron reposar por dos días se presentaron dos fenómenos sobre estas: hubo presencia de oxidación sobre las probetas y en algunas probetas parte del recubrimiento se desprendió (ver figura 24). La oxidación solo se presentó en las esmeriladas y las pulidas, esto se relaciona con el secado lento que

posibilitó la interacción del oxígeno disuelto en la suspensión con los átomos de hierro en la superficie de las probetas. En contraste, las probetas con calamina no exhibieron oxidación porque la calamina es un óxido que actúa como barrera que impide la interacción directa entre el oxígeno y el hierro.

Dado que el siguiente paso era irradiar las muestras para probar si sí había efecto del láser sobre estas, estos defectos se ignoraron, pero se requería determinar cómo se evitarían para las pruebas posteriores.

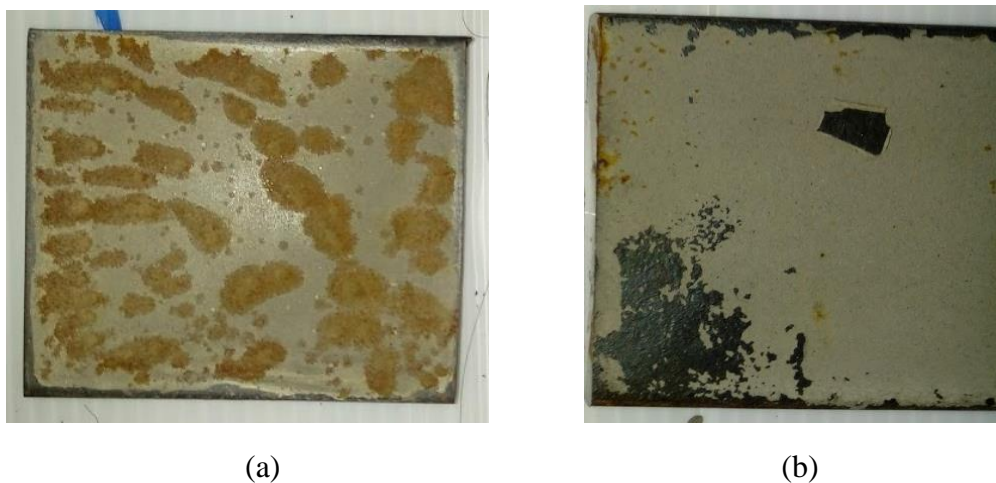


Figura 24. Defectos en probetas recubiertas: (a) Presencia de óxidos en el recubrimiento y (b) desprendimiento de recubrimiento.

Al momento de depositar la suspensión sobre las muestras se planteó hacer uso de un aerógrafo, pero se presentaron problemas ya que la boquilla se obstruyó, significando que las partículas de cenizas volantes eran muy gruesas para pasar. Haber usado este método habría permitido depositar capas más finas sobre la superficie de las probetas, aunque habría sido difícil controlar la cantidad que se depositaba.



Figura 25. Aerógrafo

Cabe resaltar que se intentó aumentar la cantidad de ceniza en la suspensión, sin embargo, al hacerlo cuando las Probetas se secaban en el horno, las capas resultantes no quedaban adheridas a la superficie de la pieza y se desprendían fácilmente, por lo que se continuo con 10g que era la cantidad que funcionaba.

Este resultado sugiere que la cantidad de agente aglutinante no fue suficiente para lograr adherencia del recubrimiento sobre la superficie del acero.

También se realizaron pruebas de aceite de linaza. A la hora de recubrir las probetas, la suspensión tardo en secarse, además las capas quedaban abultadas y con defectos (figura 26), por lo mismo el aceite de linaza se descartó como medio para realizar la suspensión.



Figura 26. Probeta recubierta con la suspensión obtenida con aceite de linaza.

3.5 Irradiación laser

Debido a los defectos presentados en las probetas recubiertas, en el irradiado se procuró por no marcar en las partes en las que previamente se había desprendido el recubrimiento.

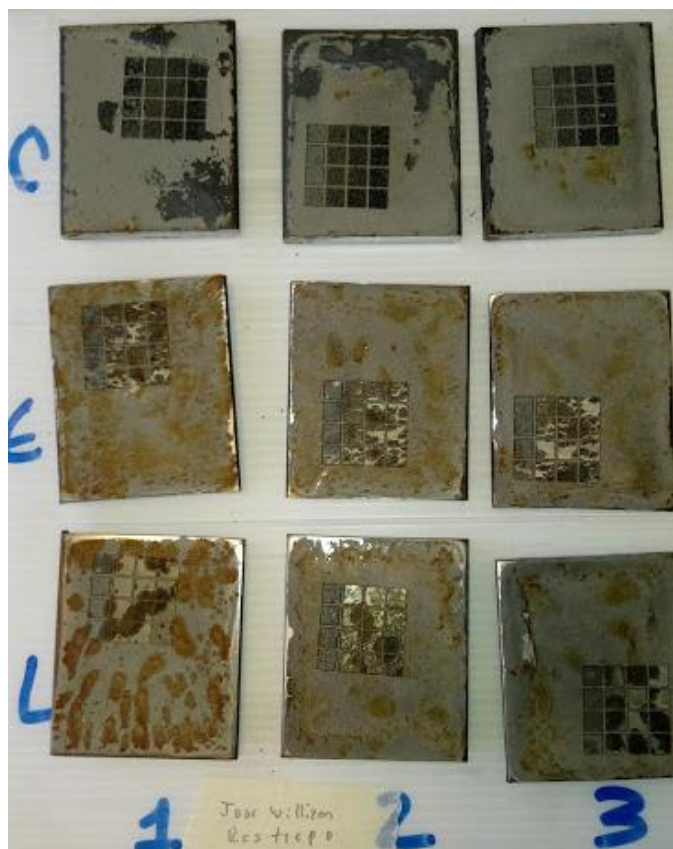


Figura 27. Probetas marcadas con la matriz inicial

Se evidencio que en las probetas que se habían lijado a espejo, la irradiación láser no tuvo el mínimo efecto, la explicación más plausible, es que la baja rugosidad de la superficie impidió que se diera un enganche mecánico entre con el recubrimiento, cuando este paso a ser irradiado y vitrificado, al no poseer enganche, el revestimiento simplemente se desprendió.

Para las demás probetas, la con calamina y la esmerilada, se produjo vitrificación del recubrimiento. En las probetas con calamina recubierta, la vitrificación de áreas más uniforme se obtuvo con altos de potencia y con bajas velocidades de avance. En las

probetas de superficie esmerilada y recubierta se notó que la vitrificación fue más significativa por el incremento en la potencia en ser muy evidente el efecto de la velocidad de avances. En ambas superficies, los vidriados formados por combinación de bajas potencias y altas velocidades de avance se desprendieron del acero con facilidad. Lo anterior se debe a que la baja concentración de energía en tales condiciones no fue suficiente para fundir la totalidad del recubrimiento y parte de la superficie del acero para formar una zona de unión que garantizara la adherencia al sustrato del recubrimiento vitrificado. Este comportamiento es explicado por Restrepo en su memoria de tesis doctoral (Montoya, 2005).

Se apreciaron diferencias en la morfología de las superficies vitrificadas según el número de capas depositadas de la suspensión; así a mayor espesor las áreas vitrificadas se veían con tonos menos intensos y aunque todas las probetas se lograron modificar exceptuando las correspondientes a las pulidas a espejo. Probetas

Teniendo en cuenta estos resultados se procedió a descartar las probetas pulidas a espejo y se continuó trabajando con las probetas con calamina y las esmeriladas. También, dado que se esperaba depositar la mayor cantidad de ceniza volante, se decidió trabajar con dos y tres capas de recubrimiento esperando que las nuevas matrices por ensayar logaran fundir las capas de ceniza.

Se volvieron a secar muestras recubiertas con las mismas condiciones, pero por los resultados del numeral anterior, se decidió descartar la superficie lijada a espejo al continuar con el trabajo, ya que no se apreciaron modificaciones en estas probetas (ver figura 28). También por los resultados anteriores se determinó no tratar igual ambas superficies en cuanto a la irradiación laser, ya que los mejores resultados en cada superficie fueron obtenidos en diferentes valores de velocidad y potencia.

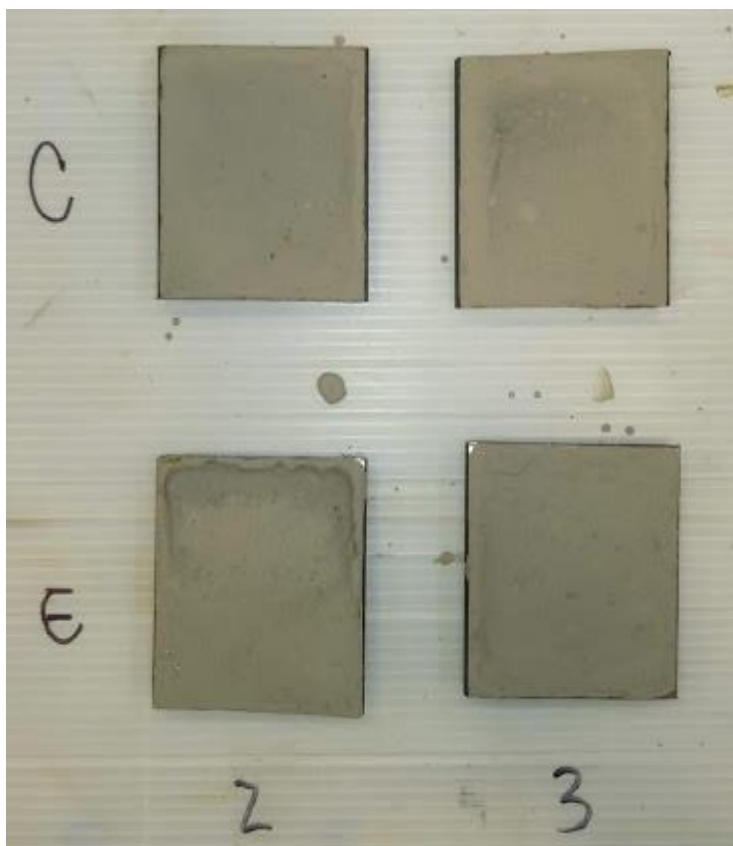


Figura 28. Nuevas probetas recubiertas con dos y tres capas de suspensión.

Se diseñaron dos nuevas matrices, esta vez de 5x5, una para cada tipo de superficie, aunque ambas con las mismas velocidades de avance del haz, para las cuales se tomaron valores de 10 a 30 mm/s con incrementos de 5 mm/s. La diferencia entre matrices radica en las potencias utilizadas; para irradiar la superficie de calamina recubierta se usaron las mismas potencias adicionando una columna de 10 kW, ya que las anteriores habían reflejado buenos resultados, pero era necesario observar los resultados a menores velocidades de avance del láser. Para la superficie esmerilada se había observado buenos resultados en 50 kW de potencia, por lo que se decidió ampliar la matriz respecto a este valor (Figura 29).

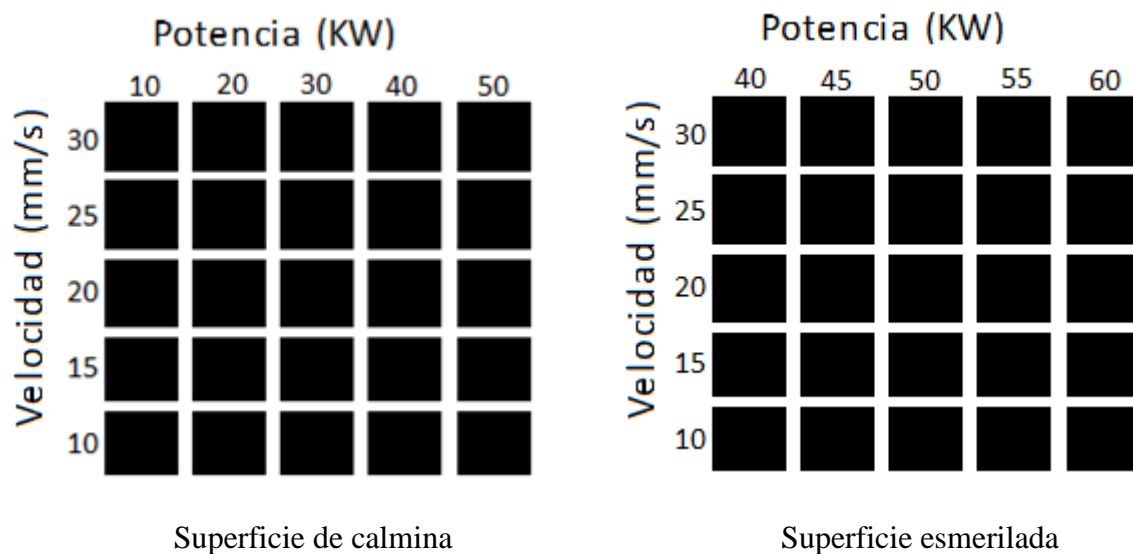


Figura 29. Matrices de densidad de energía 5x5.

Algo para tener en cuenta es que, para evitar la oxidación y los desprendimientos de recubrimiento, la irradiación de las probetas de acero recubiertas se hizo el mismo día en el que las probetas salieron del horno.

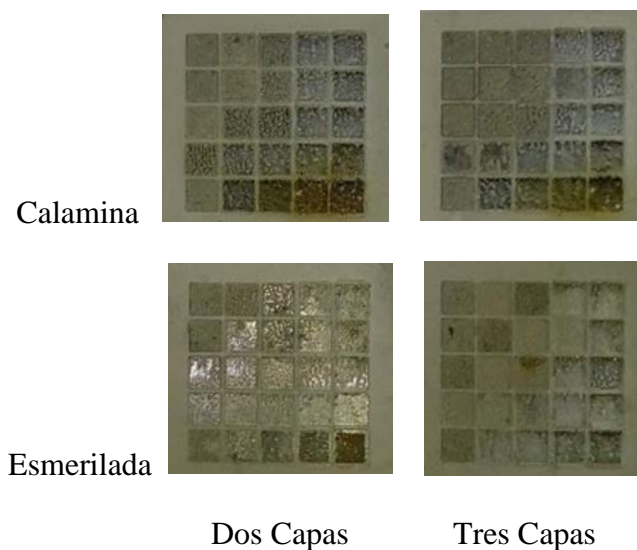


Figura 30. Nuevas probetas marcadas con su respectiva matriz

Para el análisis de estos resultados se usó la ecuación de densidad de energía, esta permite relacionar la potencia, el diámetro y la velocidad del haz laser para conocer la energía que provee el láser por unidad de área sobre la probeta. La ecuación es:

$$E_d = \frac{P}{v * D}$$

En donde:

E_d : Densidad de energía

P: Potencia del haz laser

v: Velocidad del haz laser

D: Diámetro del haz laser

En la superficie con calamina las áreas vitrificadas mostraron manchas de combustión para las densidades de energía superiores a 0.6 KJ/cm^2 . En contraste en la superficie esmerilada que se irradió con densidades de energía más altas, no se evidenciaron manchas de combustión significando que la transferencia de calor es mayor en la superficie de calamina y menor en la esmerilada, pudiendo ser esto por la capacidad reflectiva que tiene cada superficie. De nuevo mediante la inspección visual, se evidencio la influencia del espesor del recubrimiento ya que, por inspección visual, todas las probetas recubiertas con 2 capas de suspensión exhibieron áreas vitrificadas más uniformes que aquellas formadas sobre las probetas recubiertas con 3 capas de la suspensión. Para observar con mejor detalle los efectos del marcado se realizó microscopia de alta resolución sobre las Probetas.

En la Figura 31 se logra observar que a bajas densidades de energía casi no hay fusión del material ni integración con la superficie de calamina; también que en las áreas irradiadas con 0.8 kJ/cm^2 y 1.0 kJ/cm^2 se observa que sí quedo material adherido a la superficie, formando clústeres del recubrimiento vitificado y dejando zonas de la superficie sin recubrir. Como se mencionó anteriormente las densidades de energía mayores a 0.6 KJ/cm^2 presentaban manchas de combustión, mismas que no se observan en las imágenes adquiridas por microscopia óptica de las áreas en mención después de lavar las probetas irradiadas.

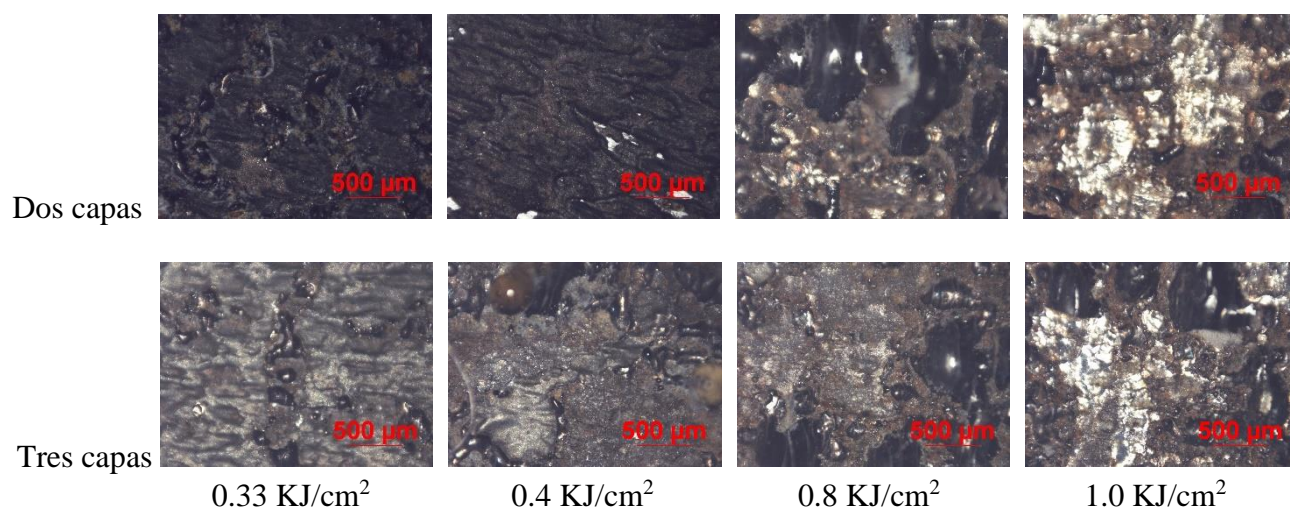


Figura 31. Superficie de calamina recubierta e irradiada.

Se observa que incluso a bajas densidades de energía se logra unir parte de las cenizas por mínima que sea, y en estas también se tiende a formar clústeres a mayor densidad de energía.

Cabe resaltar que, a este nivel de detalle, la observación muestra que hubo más fusión de cenizas en la probeta con calamina recubierta con dos capas que en las equivalentes recubiertas con tres capas.

En la Figura 32, en la superficie esmerilada con dos capas de recubrimiento, para la densidad de energía de 0.4 KJ/cm^2 no se observa fusión alguna del recubrimiento, incluso pareciese que el láser a medida que pasaba sobre este segmento no alcanzaba a fundirlo, haciendo que se desprendiera justo la parte del recubrimiento por donde el láser paso y, a estos puntos sin recubrimiento, llegaba el haz del láser por reflexión generando combustión sobre la superficie. Para la densidad de energía de 0.5 kJ/cm^2 se empieza a observar clústeres del recubrimiento fundido, aunque de menor tamaño que clústeres aquellos formados en la superficie de calamina. En la densidad de energía de 1.1 kJ/cm^2 , aunque se formaron grandes clústeres, predominan aquellas de menor tamaño y regularmente dispersas sobre el área irradiada. En la densidad de energía de 1.2 KJ/cm^2 se presentaron clústeres de similar tamaño iguales al de la anterior área, pero en esta

quedaron zonas sin material fundido implicando que una mayor densidad de energía no es necesariamente garante de mejores resultados, además la rugosidad propia de la superficie del acero también afecta la distribución uniforme del recubrimiento.

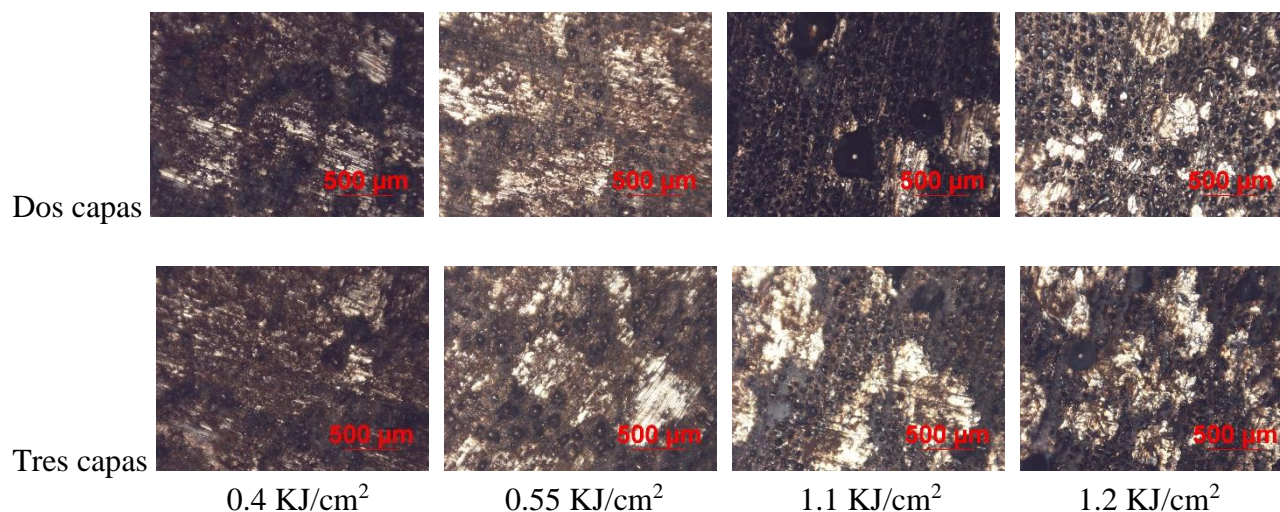


Figura 32. Superficie esmerilada, dos capas, con densidad de energía.

Se logran evidenciar similitudes en esmeril revestido con dos y con tres capas, teniendo una superficie quemada en vez de material fundido en la menor densidad de energía y presencia de clústeres en la segunda. Se puede observar que en las densidades de energía de 1.1 y 1.2 kJ/cm² la distribución de los clústeres no es tan uniforme e incluso hay zonas sin material. Comparando los resultados de la superficie esmerilada, se evidencia que la fundición de las cenizas es más uniforme en la de dos capas.

En la superficie esmerilada se evidencio una mayor distribución del material fundido formando clústeres pequeños, mientras que en la calamina el material se aglomera formando clústeres de mayor tamaño.

Acorde a las comparaciones realizadas se determinó que para ambas superficies las mejores condiciones fueron recubrir con dos capas de la suspensión de ceniza volante e irradiando a una densidad de energía de 0.8 kJ/cm² en el caso de la superficie con calamina y con 1.1 kJ/cm² cuando se trata de la superficie esmerilada

3.6 Ensayos tribológicos

Con los resultados obtenidos en las anteriores pruebas, los parámetros seleccionados son:

Tabla 3. Parámetros seleccionados

	# de capas	Potencia (KW)	Velocidad (mm/s)
Calamina	2	40	10
CMC	2	55	10



(a)

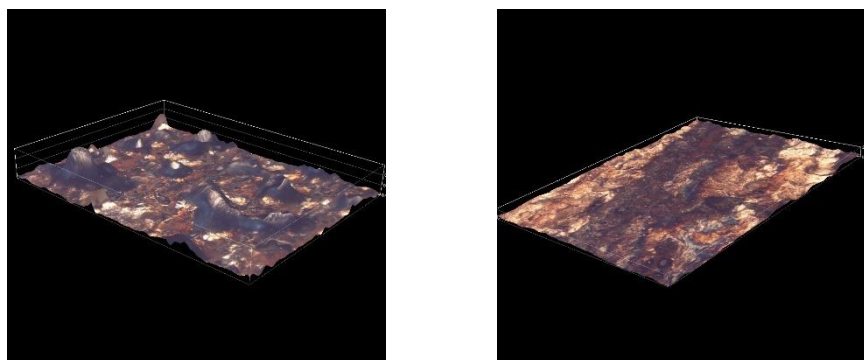


(b)

Figura 33. Probetas de 2.5 cm de lado recubiertas e irradiadas: (a) superficie de calamina y (b) superficie esmerilada.

Con los parámetros seleccionados se procedió a revestir las probetas (figura 33).

La figura 34 es la imagen 3D obtenidas de las probetas recubiertas. La superficie de calamina tratada tiene una rugosidad media de $13,08\mu\text{m}$ con un perfil máximo de $62,2\mu\text{m}$, lo que implica una superficie altamente irregular, se puede ver que los clústeres formados son altos, y que la superficie es irregular en general. En la superficie esmerilada hay una rugosidad media de $10,09\mu\text{m}$ con un perfil máximo de $26,11\mu\text{m}$, esto corresponde a una superficie uniforme con algunos picos en su superficie.



Calamina

Esmeril

Figura 34. Imágenes 3D de los sustratos revestidos

En la figura 35a, se hace un comparativo entre los resultados del ensayo tribológico en la superficie de calamina sin recubrir (azul) contra una pieza ya recubierta e irradiada (roja), donde se evidencia un aumento del coeficiente de fricción.

En la figura 35b se muestra que en la superficie esmerilada sin recubrir (morada) el coeficiente tiene un valor bajo, pero se dispara al final, esto significa que a medida que hace el barrido el contra cuerpo, la fricción va aumentando, se desconoce porque se presenta este fenómeno. Por otro lado, la muestra recubierta tiene alta dispersión en los valores sin llegar a estabilizarse.

En ambos casos las superficies recubiertas presentaron alta variación en los valores del coeficiente de fricción, aunque los valores suelen estabilizarse después de un tiempo, aquí no ocurrió, significando que las superficies no quedan uniformes después de fundir el recubrimiento y que se obtiene una superficie muy irregular. Mediante líneas de tendencia se observa mejor el comportamiento y se evidencia que en ambos casos se obtuvo un aumento en el coeficiente de fricción; en la superficie de calamina se consiguió un gran aumento, la línea de tendencia en la probeta que no fue irradiada llega a un valor de 0.05 mientras que en la probeta irradiada llega a un valor promedio de 0.3. Por otro lado, la superficie esmerilada sin irradiar presenta un valor cercano a 0.22 y de 0.28 ya irradiada, lo que indica un cambio, aunque no tan significativo como el anterior.

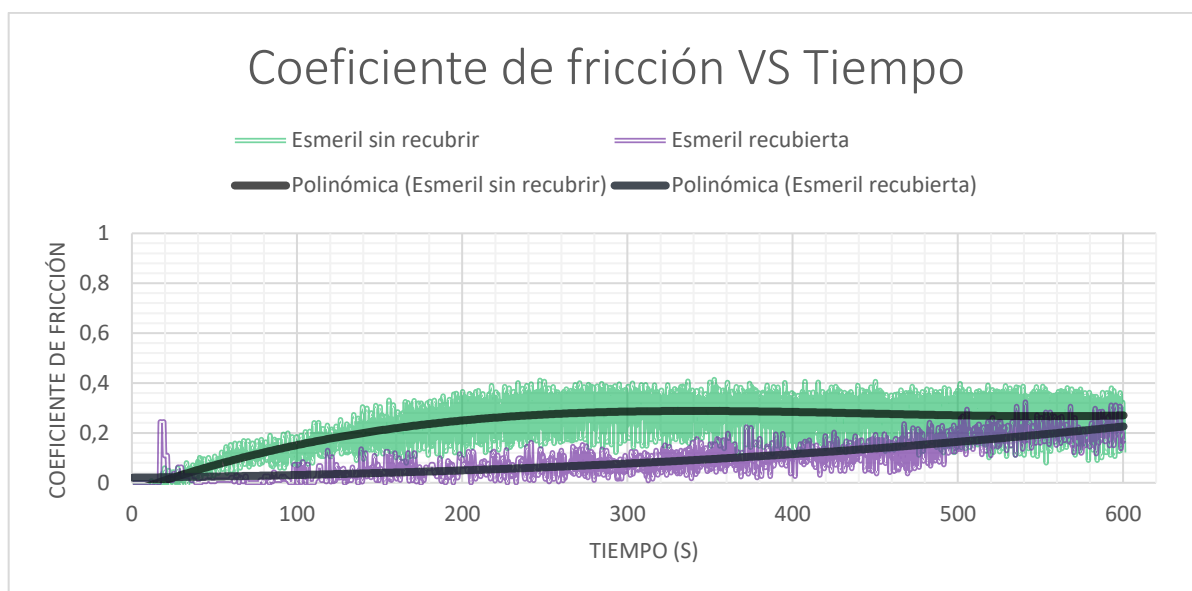
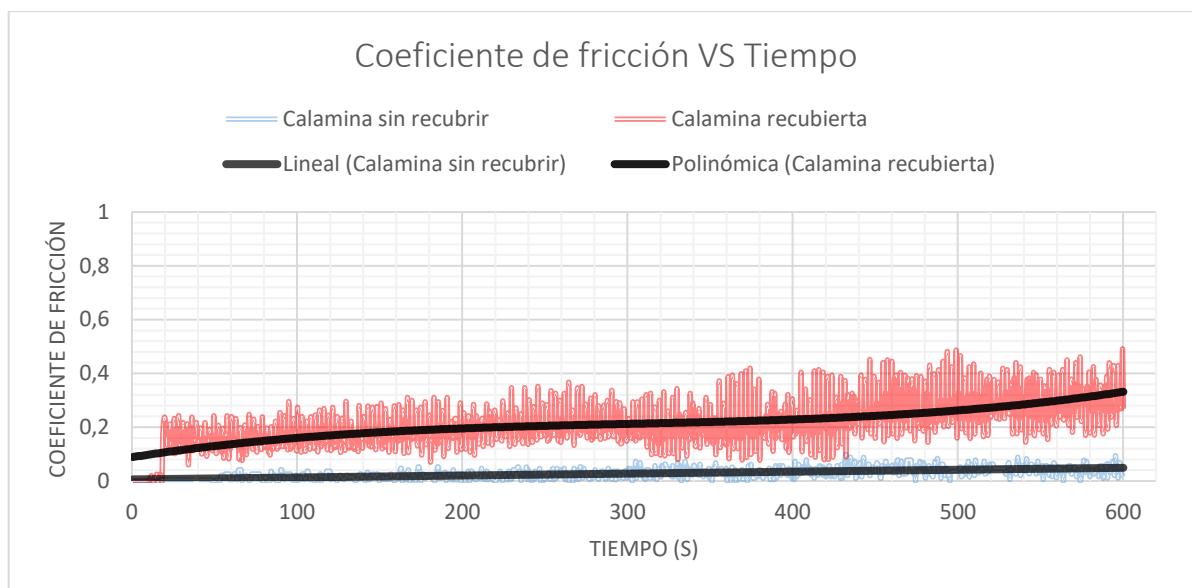


Figura 35. Comparativo de resultados de ensayos tribológicos antes y después de tratarlas con el láser para: (a) superficie de calamina y (b) superficie esmerilada.

A la luz de estos resultados el revestimiento por láser con cenizas volantes condujo hacia el aumento del coeficiente de fricción que no es favorable aplicar en elementos mecánicos como rodamientos, ejes, bujes y rotulas, donde se requiere deslizamiento, pero podría ser

útil en componentes que requieran mayor agarre como frenos o elementos de acople o unión que deban evitar el deslizamiento.

La Figura 36 muestra imágenes obtenidas por microscopia óptica después de realizar el ensayo tribológico en cada probeta, estas revelan el aspecto de las superficies después del contacto con el contra-cuerpo que induce el desgaste.

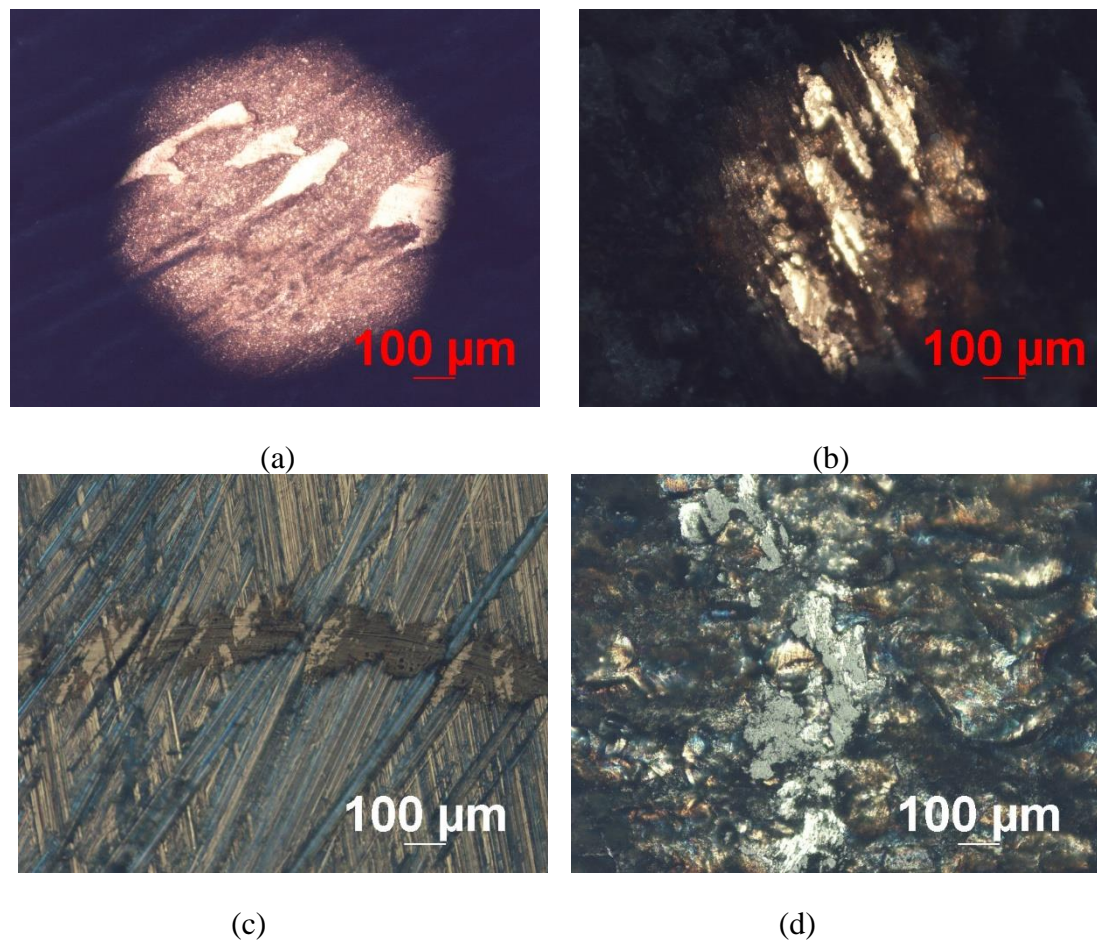


Figura 36. Imágenes obtenidas por microscopia: (a) superficie de calamina sin tratar, (b) superficie de calamina tratada, (c) superficie esmerilada sin tratar y (d) superficie esmerilada tratada.

En la figura 37, se observa que en la superficie de calamina tanto antes como después de tratar el desgaste fue superficial, es decir que lo que se desbasto por efecto de la prueba fueron picos de rugosidad y no se generaron valles, este mismo efecto se presenta en la

superficie esmerilada tratada, en cambio la superficie esmerilada sin tratar presenta desgaste hasta generar un valle. Esto quiere decir que, en ambos casos, al tratar la superficie, el revestimiento genera una capa superficial resistente al desgaste abrasivo, el efecto puede ser mayor en la superficie de calamina que también tiene esta característica en su superficie inicial, por lo que al tratarla esta se ve reforzada. Cabe resaltar que el revestimiento de las superficies tratadas fue resistente, y no se desprendió por efecto de la prueba tribológica, lo que implica una buena unión con la superficie de la probeta.

Se logró evidenciar la formación de huellas a lo largo del trayecto del contra cuerpo con un aspecto homogéneo. Se puede apreciar que el desgaste mostrado por la esfera durante la prueba con las superficies tratadas (28b y 28d) es mayor que las superficies sin tratar (28a y 28c), lo cual se debe probablemente a que estas muestras presentaban una mayor rugosidad y, como se analizó a partir de la figura 35, un mayor coeficiente de fricción.

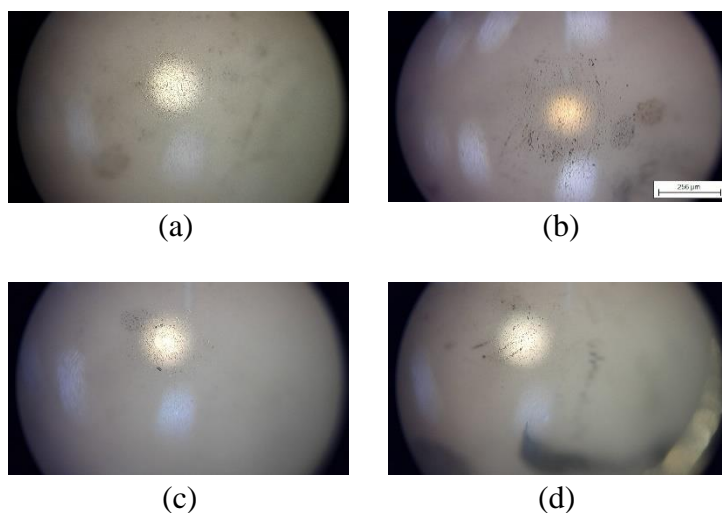


Figura 37. Imágenes obtenidas por microscopia de contra cuerpos de alúmina después de los ensayos tribológicos: superficie de calamina: (a) antes de recubrir y (b) recubierta e irradiada, y superficie esmerilada: (c) antes de recubrir y (d) recubierta e irradiada.

En resumen, los ensayos tribológicos demostraron que el tratamiento con cenizas volantes genera un aumento en el coeficiente de fricción en ambas superficies, pero más significativamente en la superficie de calamina. La alta variabilidad en los valores se debe a las imperfecciones de la superficie, ya que la rugosidad se ve incrementada por el

tratamiento, significando también que el tratamiento planteado no tiene un resultado uniforme. No se evidencio desprendimiento por el desgaste generado en la prueba tribológica, lo que implica buena unión entre el revestimiento y la probeta independiente de su superficie.

4. CONCLUSIONES

Los aprendizajes adquiridos a través de la realización de este trabajo de grado fueron:

La suspensión usada tenía una razón entre el agente usado y las cenizas volantes de 3% (0,3 g de CMC sobre 10 g de ceniza volante), esto representa una gran ventaja de usar el CMC como agente aglutinante ya que no varía mucho la composición química de la suspensión; de modo que una vez seco el recubrimiento queda conformado mayoritariamente por la ceniza volante.

La condición superficial del acero sustrato parece influir sobre la absorción de la radiación laser, ya que las densidades de energía requeridas para vitrificar un área del recubrimiento depositado sobre la superficie del acero con calamina fueron menores que la requerida para vitrificar el recubrimiento depositado sobre la superficie esmerilada del acero. También es importante tener en cuenta que al retirar la calamina y recubrir probetas, se corre el riesgo de oxidación debido a la interacción entre el oxígeno presente en la suspensión y el hierro.

Las áreas más uniformes no muestrean una superficie completamente vitrificadas, sino conformada por clústeres casi esférico del recubrimiento fundido que están dispersos sobre zona de acero descubiertas. Esta morfología parece estar asociada con la densidad de energía absorbida y por ende con la entrada calórica que funde el recubrimiento. Asimismo, la morfología de las áreas irradiadas también depende del espesor del revestimiento, puesto que para las mismas condiciones de irradiación se vitrifico mayor volumen del recubrimiento de 2 mm que cuando el espesor fue de 3 mm.

Existen rangos de densidades de energía para formar áreas de revestimiento vitrificado aceptables. Densidades de energía menores a ese rango funden parcialmente el recubrimiento, pero no la superficie del acero para generar enganche mecánico causando

que el revestimiento generado se desprenda. Por otro lado, densidades de energía mayores inducen formación de clústeres más grandes e irregulares, pero en menor cantidad dejando mucha porción del acero sin cubrir.

Las áreas de recubrimiento irradiadas sobre la superficie de calamina exhibieron una morfología con clústeres más grandes rodeados porciones de acero descubierto, mientras áreas irradiadas en las mismas condiciones sobre las superficies esmeriladas mostraron una morfología estaban conformadas por clústeres más pequeños, en mayor cantidad y mejor distribuidos cubriendo mayores porciones del acero. Esto se aduce a que la superficie esmerilada posee múltiples rayones que por factores energéticos favorecen la nucleación simultánea de los pequeños clústeres del recubrimiento fundido.

En ambos casos, superficie de calamina y esmerilada tratadas, los revestimientos formados al irradiar con el láser exhiben aumento en el coeficiente de fricción respecto a los sustratos originales, evidenciando así la oportunidad del laser cladding y las cenizas volantes cuando se busca aumentar esta propiedad superficial.

En ciertos momentos, la metodología con la que se procedió debe considerar varios ajustes con el fin de encontrar morfologías de vidriados más uniformes

Se planteó caracterizar químicamente, vía SEM, tanto las cenizas volantes como los agentes aglutinantes, y así conocer a ciencia cierta que se estaba depositando sobre las probetas, y prever mejor los efectos a obtener con la aplicación del láser. También hubiera sido propicio caracterizar químicamente la superficie del acero sobre todo la de calamina.

No se contó con un viscosímetro que permitiera calcular adecuadamente el valor de esta propiedad en las pruebas de la suspensión, conocer este valor hubiera permitido por ejemplo llegar a una cantidad óptima del CMC que requería la suspensión.

Contar con un matraz hubiera permitido obtener partículas más finas de la ceniza volante y esto a su vez permitiría usar otras técnicas para depositar como aerografía.

Sin duda alguna el mayor resultado de este trabajo es la cantidad de conocimiento adquirido, no solo a través de la teoría preliminar sino sobre todo en el campo

experimental, afianzando conocimientos sobre materiales, superficies, suspensiones, uso de equipo de laboratorios, tratamientos superficiales y tratamientos térmicos.

5. Trabajos futuros

Teniendo en cuenta las conclusiones de este trabajo exploratorio y las otras pruebas realizadas se proponen realizar trabajos futuros a partir de estos resultados:

Una posibilidad aportar la ceniza volante e irradiar con el láser simultáneamente con ayuda de una maquina CNC. Como se mencionó hay proyectos que ya están trabajando sobre esta idea, pero solo se hace para fabricar probetas a partir de metal en polvo y no para recubrir probetas ya fabricadas para modificar características superficiales.

La suspensión química para recubrir puede ser optimizada, pudiendo experimentar hasta llegar a la menor cantidad de agente aglutinante con la mayor cantidad de ceniza para recubrir adecuadamente las probetas sin que está presente defectos o problemas a la hora de secarse. También es necesario analizar otros agentes que puedan superar las ventajas de usar CMC.

Formular una suspensión de ceniza volante que permita su aplicación por pulverización de modo que el recubrimiento sea más uniforme en rugosidad y en espesor. De igual forma, usar sustraídos de acero induciendo rayones finos con lijas suaves eliminado así la irregularidad que se produjo en la superficie de las probetas esmeriladas, pero sin llevarlas al acabado a espejo. También se puede pensar en aplicar ataques con ácidos para inducir puntos de anclaje en la superficie de acero de modo de obtener recubrimientos más uniformes en toda su extensión

Establecer relaciones entre las variaciones de los parámetros, (superficie, cantidad de recubrimiento y densidad de energía trasferida) con las variaciones del coeficiente de fricción después de tratar las probetas.

6. Bibliografía

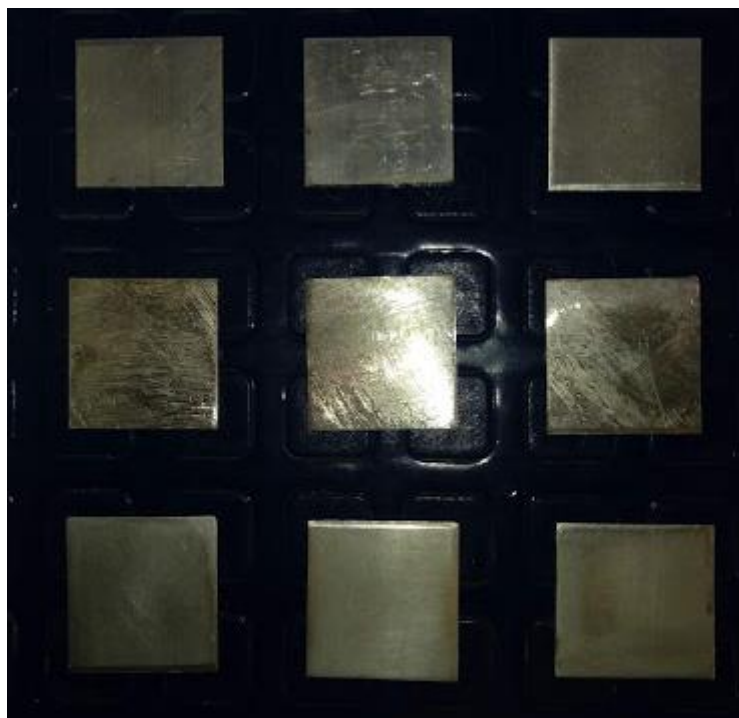
- Amahjour, F. (2000). Estudio de la reactividad de las puzolanas artificiales: cenizas volantes y humo de sílice, y su reutilización en ingeniería civil, 1.
- Blissett, R. S., & Rowson, N. A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.024>
- Bordallo López, E. (2014). Carboximetilcelulosa anfifílica: síntesis, caracterización y estudio en disolución, 1.
- Broseta Carrasco, J. (1982). Estudio del temple por inducción de engranajes, 1.
- Ciro, Y. (2014). Polyvinyl alcohol derivatives: Promising materials for pharmaceutical and biomedical applications. <https://doi.org/10.5897/AJPP2013.3906>
- Clavijo Penagos, J. (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Elementos*, 3(3), 133–146.
- Fabian, A. C., Rees, M. J., Stella, L., & White, N. E. (1989). X-ray fluorescence from the inner disc in Cygnus X-1. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 238(3), 729–736. <https://doi.org/10.1093/mnras/238.3.729>
- Friction between surfaces - Fricción - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Retrieved November 19, 2019, from https://es.wikipedia.org/wiki/Fricción#/media/Archivo:Friction_between_surfaces.jpg
- Gómez Botero, M. A., Esteve Pujol, J., & Universitat de Barcelona. Departament de Física Aplicada i òptica. (2007). *Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros*. Universitat de Barcelona.
- Gómez, M. A., & Restrepo, J. W. (2014). VIDRIADO CON LÁSER DE Nd:YAG SOBRE AZULEJOS RECUBIERTOS DE BARNICES DE COBALTO CON FRITA BORÁICA Y SIN FRITA (Nd:YAG LASER ENAMELING ON GLAZED TILES COATED WITH COBALT VARNISHES WITH AND WITHOUT BORAX FRIT/VIDRADO COM LASER DE Nd:YAG SOBRE AZULEJOS RECO. *Revista EIA*, 7(13), 185–195. <https://doi.org/10.24050/REIA.V7I13.493>
- Groover, M. P., Peña Gómez, C. M. De la, Martínez Sarmiento, M. A., & Sandoval Palafox, F. J. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna : materiales, procesos y sistemas*. Prentice-Hall. Retrieved from <http://www.atmosferis.com/tipos-de-acero/>
- Kula, P., Pietrasik, R., & Dybowski, K. (2005). Vacuum carburizing - Process optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, 876–881. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.145>
- Montoya, J. W. R. (2005). MARCADO Y ESMALTADO DE MATERIALES CERÁMICOS CON LÁSER. Retrieved from http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/41788/1/TESIS_JW_RESTREPO_MONT_OYA.pdf

- Pecina, J. N., Lover, L. M., Dalibon, E. L., & Brühl, S. P. (2016). INFLUENCIA DE LA NITRURACIÓN POR PLASMA SOBRE EL COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN Y LA ADHESIÓN DE RECUBRIMIENTOS DLC SOBRE ACERO INOXIDABLE AISI 420 INFLUENCE OF PLASMA NITRIDING ON THE CORROSION BEHAVIOUR AND ADHESION OF DLC COATINGS DEPOSITED ON AISI 420 STAINLESS STEEL, 7(2), 45–56. Retrieved from http://www.excedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/
- Pérez Ruiz, E. A., Galeano Perilla, A. C., & Negrín Hernández, L. I. (2016). Evaluación de la dureza y microestructura del acero 1045 templado en sustancias refrigerantes no tradicionales Evaluation of hardness and microstructure of 1045 steel quenched in no conventional coolants. *Scientia et Technica Año XXI*, 21(3). Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/849/84950585002.pdf>
- Pinkerton, A. J. (2015). Advances in the modeling of laser direct metal deposition. *Journal of Laser Applications*, 27(S1), S15001. <https://doi.org/10.2351/1.4815992>
- Piqué, T. M., & Vázquez, A. (2012). *USO DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) EN EL ESTUDIO DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO* (Vol. 3).
- Renau-Piqueras, J., & Faura, M. (1994). Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido 1.-Introducción. Retrieved from http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/9313/CC-011_art_5.pdf;sequence=1
- Shoji, S., Nakamura, M., & Horiuchi, H. (1985). Histopathological changes in dental pulps irradiated by CO2 laser: A preliminary report on laser pulpotomy. *Journal of Endodontics*, 11(9), 379–384. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(85\)80024-8](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(85)80024-8)
- Surface Profile Explorer | Practical Coatings Science | Prof Steven Abbott. (n.d.). Retrieved November 19, 2019, from <https://www.stevenabbott.co.uk/practical-coatings/surface-profile-explorer.php>
- Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32(2), 05–12. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001>
- Universidad de Medellín, W. . B. J. . D. A. E. (2015). *Revista ingenierías. Revista Ingenierías Universidad de Medellín* (Vol. 14). Universidad de Medellín. Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/750/75045730006/>
- Velasco, R. J., Luna, W. A., Mera, J. A., & Villada, H. S. (2008). Producción de dextrinas a partir de almidón nativo de yuca por ruta seca en una agroindustria rural. *Informacion Tecnológica*, 19(2), 15–22. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642008000200003>
- Weng, F., Chen, C., & Yu, H. (2014). Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review. *Materials and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.077>
- Zhai, C., Gan, Y., Hanaor, D., Proust, G., & Reintant, D. (2016). The Role of Surface Structure in Normal Contact Stiffness. *Experimental Mechanics*, 56(3), 359–368.

<https://doi.org/10.1007/s11340-015-0107-0>

ANEXO I

Durante el desarrollo se realizaron pruebas sobre el aluminio, para ello se diseñaron muestra tal cual se había hecho con el acero: superficie de alúmina, superficie esmerilada, y superficie espejo, estas muestras se recubrieron con la suspensión de 0.3g de CMC y se pasaron por el horno como en las de acero, obteniendo de la misma manera probetas con una, dos y tres capas del recubrimiento. Se procedió a irradiar con la primera matriz de densidad de energía. El resultado fue que las muestras no se irradiaron. Al parecer no hubo ningún enganche mecánico que permitiera una unión entre la suspensión y las probetas de aluminio. Además, por la reflexión de las superficies, no se absorbió energía del laser y ni siquiera quedaron marcadas las muestras.



Probetas antes de recubrir.



Probetas recubiertas e irradiadas.

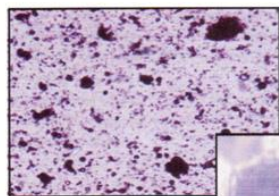


Probetas irradiadas y posteriormente lavadas.

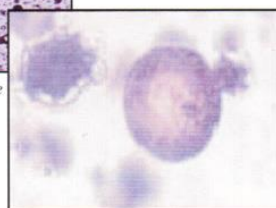
ANEXO II

**DESCRIPCIÓN:**

Es una ceniza volante de color gris, sólida, fina y de forma esférica, resultante de la combustión del carbón molido o en polvo tipo bituminoso, que tiene propiedades puzolánicas (cementantes) que se activan al reaccionar el hidróxido de calcio (cal) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ producido durante la hidratación del cemento Portland con los silicatos solubles de álcali o "cristales" de la ceniza.



Partículas aglomeradas de Ceniza Volante (4X)



Cenosferas en Ceniza Volante al microscopio (63X)

ESPECIFICACIONES:

Para el detalle de las especificaciones técnicas, referenciarse a la norma técnica colombiana NTC 3493, que es idéntica a la norma ASTM-C 618.

USOS:

- Como adición al cemento Portland.
- Como adición al hormigón utilizado para estructuras de concreto o al mortero utilizado para los acabados.
- Como adición en la fabricación de bloques prefabricados con cemento Portland.
- Como adición en la fabricación de ladrillos de arcilla.
- Como adición en las bases granulares para pavimentos semiflexibles de carreteras, autopistas, pistas de aterrizaje y estacionamientos.
- En la inyección de pozos petrolíferos.
- En la reducción de la acidez de los suelos (agricultura).

VENTAJAS:

Bajo determinadas condiciones, como adición en el hormigón, brinda las siguientes ventajas:

- Se logran las mismas o mayores resistencias a la compresión a los 28 días de fraguado el hormigón, que una mezcla de control tradicional, con menores consumos de cemento por m^3 y por tanto menores costos.

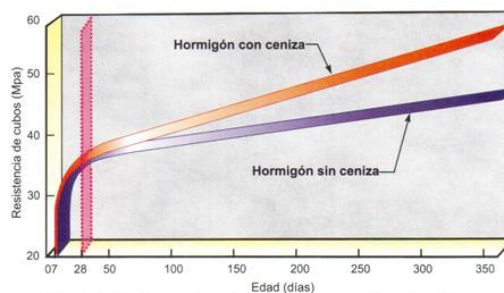


Gráfico 1. Relación entre la resistencia a la compresión y la edad para hormigones con y sin ceniza volante.

- A edades de fraguado posteriores a los 28 días, se logran mayores resistencias a la compresión que las mezclas de hormigón tradicional. Gráfico 1.
- Por su finura y forma esférica, permite reducir la cantidad de agua necesaria de la mezcla tradicional, Gráfico 2, obteniendo la misma trabajabilidad. Además, mejora la aptitud de bombeo de la mezcla por medios mecánicos, ya que disminuye la fricción entre las partículas de los áridos y entre el hormigón y la tubería.

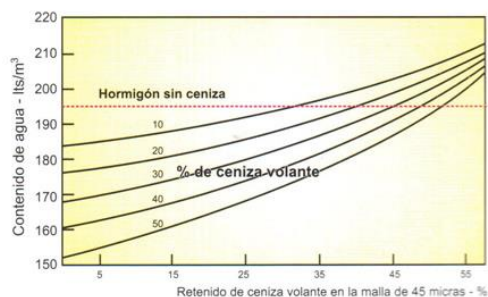


Gráfico 2. Efecto del retenido de ceniza volante sobre el contenido de agua de un hormigón cuyo asentamiento es de 5 a 7.5 cm. con un consumo de cemento de 300 Kg/m^3 al cual se le agregaron diversos porcentajes de ceniza volante.

- Reduce la exudación y la tendencia a la segregación del hormigón. **Gráfico 3.**

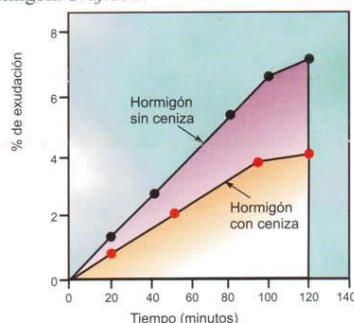


Gráfico 3. Efecto de la incorporación de las cenizas volantes en la exudación del hormigón.

- Permite reducir el calor generado durante la hidratación.

Gráfico 4.

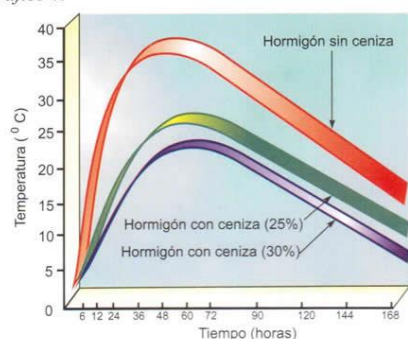
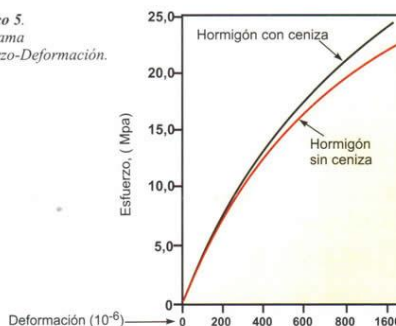


Gráfico 4. Influencia de la ceniza en la temperatura del hormigón.

Bajo determinadas condiciones, se obtienen hormigones endurecidos:

- Más durables.
- Más impermeables, puesto que la reacción puzolánica reduce el tamaño de los poros en la pasta cementicia, lográndose además una mayor resistencia a la corrosión en las armaduras de acero.
- Con una menor retracción (al reducir la relación agua/material cementante)
- Con más adherencia a las armaduras de acero.
- Con menor expansión nociva, puesto que reduce la disponibilidad de compuestos alcalinos que al reaccionar con los áridos que contienen sílice reactiva, pueden producirla.
- Con menor eflorescencia.
- Con más resistencia al ataque de sulfatos y ácidos.
- Con un módulo de elasticidad mayor con el tiempo de fraguado. **Gráfico 5.**
- Conserva las mismas características del hormigón tradicional en lo relacionado con el impacto, la abrasión y la exposición a altas temperaturas.

Gráfico 5.
Diagrama
Esfuerzo-Deformación.



MODO DE EMPLEO:

Para su dosificación y uso, se deberá contar con la asesoría de un profesional en el tema y cumplir con la NSR-98.

PRECAUCIONES:

- Los hormigones deben ser producidos con estándares de calidad adecuados para obtener las resistencias requeridas, de acuerdo a los procedimientos exigidos por la NSR-98 capítulo C.5. Se deberá tener especial cuidado con el curado del hormigón.
- En la preparación del hormigón con ceniza volante se debe tener especial cuidado en el control de la relación agua/material cementante (cemento + ceniza volante)
- Se recomienda siempre tomar cilindros de prueba, como testigos, para fallar a los 56 días.
- Su dosificación debe hacerse siempre en peso, con una tolerancia de $\pm 3\%$ de la cantidad especificada.
- La ceniza debe introducirse a la mezcladora simultáneamente con los demás componentes.

Si se dosifica inadecuadamente:

- Se puede retrasar el fraguado inicial del hormigón y por tanto su resistencia a edades tempranas.
- Se pueden obtener hormigones de bajas resistencias.

PRESENTACIÓN:

El suministro se hace en sacos de 30 Kg.

ALMACENAMIENTO:

Se debe almacenar en lugares que la conserven frente a la humedad.

NORMAS DE SEGURIDAD Y AMBIENTALES:

Para su manipulación y manejo se debe cumplir con las mismas normas que se estipulan para el cemento.

NOTA:

Para referencias bibliográficas, consultar al proveedor.